

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
ГЕОХИМИИ И КОСМОХИМИИ
(МАГК)

РАБОЧАЯ ГРУППА
ПО ПОИСКОВОЙ ГЕОХИМИИ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ
им. академика А. П. ВИНОГРАДОВА

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Материалы Второго международного симпозиума
«Методы прикладной геохимии»

Ответственные редакторы

д-р геол.-мин. наук В. В. Поликарпочкин,
канд. геол.-мин. наук Н. А. Китаев



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1986



УДК 519.24:550.84

Математическая обработка геохимических данных. — Новосибирск: Наука, 1986.

Освещаются вопросы, касающиеся обработки геохимической информации на ЭВМ. Рассмотрены различные системы и проблемы обработки информации и информационное обеспечение автоматических систем, первичные ореолы и исследование зональности, оценки месторождений и количественный прогноз выходящего на поверхность и скрытого оруденения, опыт обработки геохимической информации в производственных геологических объединениях, региональные геохимические карты, анализ крупнообъемного опробования, пути повышения информативности геохимических данных.

Сборник рассчитан на широкий круг геологов.

Р е ц е н з е н т ы Ю. П. Т р о ш и н, Г. Д. Ф е о к т и с т о в

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я

д-р геол.-мин. наук И. С. Ломоносов, канд. геол.-мин. наук
Л. А. Филиппова, канд. геол.-мин. наук Г. А. Белоголова,
канд. геол.-мин. наук П. В. Богатырев

А. И. ГАВРИШИН, А. КОРАДИНИ, М. ФУЛЬКИНЬОНИ

НОВЫЙ МЕТОД И КОМПЛЕКС ПРОГРАММ НА ЭВМ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Задача классификации геохимических наблюдений по множеству показателей является одной из наиболее распространенных при анализе информации. Эта задача связана с объективизацией процедуры геохимического картирования, с выделением геохимических аномалий и установлением их генезиса, изучением закономерностей формирования химического состава природных объектов и т. д. Этой проблеме последнее время посвящены многие публикации [Коган и др., 1972; Родионов и др., 1979; и др.], использован широкий комплекс статистических и эвристических методов (критерии Родионова, Хотеллинга, Кульбака, факторный анализ, распознавание образов и т. п.). При этом классификационные задачи таковы: выделение однородных классов наблюдений в условиях отсутствия априорных сведений о таксономических единицах; построение объективных границ между известными эталонными классами; классифицирование новых наблюдений по заданным таксономическим единицам.

Наиболее важна для геохимиков и сложна по реализации первая ситуация, т. е. построение классификации в условиях неопределенности. Задача классификации может быть сформулирована следующим образом: множество наблюдений N , охарактеризованных M признаками, необходимо разделить на подмножества — однородные таксоны, внутри которых наблюдения в известном смысле близки между собой, а таксоны максимально различны.

При разработке критерия и способа классификации геохимических наблюдений мы исходили из нескольких требований: многомерности решающего правила; необходимости учета различных средних значений признаков, их изменчивости и взаимосвязей; построения классификаций разной детальности в условиях неопределенности; оценки различий между однородными таксонами и определения информативности отдельных признаков.

Предполагалось, что в однородных таксонах распределение признаков однодimensionalное и довольно легко может быть сведено к нормальному (например, логарифмированием). Тогда для простейшего случая независимых признаков и наблюдений критерий Z^2 имеет широко известный вид [Хальд, 1956; Handbook..., 1972]:

$$Z^2 = \sum_{ij}^{MN_1} \frac{(x_{ij} - \mu_i)^2}{\sigma_i^2} = \sum_{ij} Z_{ij}^2, \quad (1)$$

где x_{ij} — значение признака i ($1, 2, \dots, M$) в наблюдении j ($1, 2, \dots, N_1$); Z_{ij} — нормированное значение; μ_i , σ_i — среднее и стандартное отклонение признака i в однородном таксоне. Z^2 имеет распределение χ^2 с числом степеней свободы $f = M \cdot N_1$.

Если для некоторых значений x_{ij} величина $Z^2 > \chi_{q,f}^2$, то данные значения x_{ij} не принадлежат к многомерной генеральной совокупности с параметрами μ_i и σ_i , которая характеризует однородный таксон. Для

удобства практического использования применено одно из преобразований, основанное на свойстве распределения χ^2 приближаться к нормальному с увеличением f [Handbook..., 1972]:

$$G = \sqrt{2Z^2} - \sqrt{2f - 1} \quad (2)$$

или

$$G = \frac{(\chi^2/f)^{\frac{1}{3}} - \left(1 - \frac{2}{9f}\right)}{(2/9f)}. \quad (3)$$

Условия независимости признаков и наблюдений существенно ограничивают возможности применения критерия. Действительно, концентрации многих элементов корреляционно связаны, а с увеличением детальности исследований появляются зависимости между наблюдениями. С помощью формулы А. А. Багрова [1969]

$$n = \frac{N^2}{\sum_{pq} r_{pq}^2}, \quad (4)$$

которая определяет соотношение между числом зависимых наблюдений N и статистически эквивалентным числом независимых n , получено общее решение, позволяющее проверять H_0 при зависимых признаках и наблюдениях:

$$Z^2 = \frac{M}{\sum_{sh} r_{sh}^2} \cdot \sum_i \left(\frac{N_1}{\sum_{pq} r_{pq}^2} \cdot \sum_j Z_{ij}^2 \right) = k \sum_i \left(k_i \cdot \sum_j Z_{ij}^2 \right), \quad (5)$$

$$k = \frac{M}{\sum_{sh} r_{sh}^2}, \quad k_i = \frac{N_1}{\sum_{pq} r_{pq}^2},$$

где r_{sh} — коэффициент корреляции между признаками s и k ; r_{pq} — коэффициент корреляции между наблюдениями p и q . Если для некоторых наблюдений N_1 величина $Z^2 > \chi_{q,f}^2$ при уровне значимости q и числе степеней свободы $f = N_1 \cdot k \cdot \sum_i k_i$, то наблюдения не принадлежат к данному однородному таксону.

Наиболее широко в поисковой геохимической практике встречается ситуация, когда признаки зависимы, а наблюдения независимы. Этот случай рассмотрен авторами наиболее детально:

$$Z^2 = \frac{M}{\sum_{sh} r_{sh}^2} \cdot \sum_i \sum_j Z_{ij}^2 = k \cdot \sum_{ij} Z_{ij}^2, \quad (6)$$

$$f = N_1 \cdot M \cdot k.$$

Критерий Z^2 положен в основу классификационной процедуры, осуществляющей поиск наблюдений. Эти наблюдения принадлежат однородным таксонам. Для центрального варианта G -метода разработано два способа классификации наблюдений: центральный метод средних параметров и центральный метод ближайших точек. В соответствии с процедурой центрального метода средних параметров по заданному числу наблюдений рассчитываются начальные параметры (исходная система координат), по которым для каждого наблюдения вычисляется величина Z^2 . Отыскиваются три наблюдения с минимальными значениями Z^2 , принимаемые за центр формирования первого однородного таксона. Из наблюдений, не вошедших в первый таксон, аналогичным образом выделяется второй однородный таксон и т. д. Процедура центрального метода ближайших точек подобна вышеописанной, но нахождение тех наблюдений, составляющих центр однородного таксона, осуществляется по минимуму расхождений

между наблюдениями, т. е. по минимуму величины Z_{pqr}^2 :

$$Z_{pqr}^2 = \sum_i [Z_{pi} - Z_{qi}]^2 - (Z_{pi} - Z_{ri})^2 - (Z_{qi} - Z_{ri})^2, \quad (7)$$

где Z_{pi} , Z_{qi} и Z_{ri} — нормированные значения признака i в наблюдениях p , q и r .

После построения классификации оценивается информативность отдельных признаков. Для этого вычисляется матрица различий (Z_{ab}^2) между всеми классами. Неинформационные признаки исключаются из рассмотрения. По величине

$$Z_i^2 = \sum_{ab} Z_{ab}^2 \quad (8)$$

составляют ряд информативности признаков в данном классификационном построении.

Суммируя матрицы различий между однородными таксонами по каждому признаку, можно получить матрицу различий по всем признакам одновременно, что дает ценную информацию о взаимоотношениях между таксонами. Сумма элементов последней матрицы дает представление об обобщенном различии наблюдений в данной классификационной структуре.

Для практической реализации G -метода классификации многомерных геохимических наблюдений составлен комплекс программ для ЭВМ Минск-32, EC-10-22 и UNIVAC-1110. Серия программ «Анатф» (ANATFU-1 и -2, ANATF) предназначена для классификации независимых наблюдений в условиях неопределенности по центральному методу средних параметров; программами предусмотрены оценки информативности признаков и различий между однородными таксонами; стандартный размер исходного массива для классификации — 1000 наблюдений на 10 признаков.

Серия программ «Оптим» используется для классификации независимых наблюдений в условиях неопределенности по центральному методу ближайших точек; оцениваются информативность признаков и различия между однородными таксонами; осуществляется классифицирование новых наблюдений относительно найденной классификационной структуры; стандартный размер массива для построения классификации — 500 наблюдений на 20 признаков, массив наблюдений для классифицирования не ограничивается.

Программа «Агат» осуществляет построение двойной иерархической структуры (группы и класса) в условиях неопределенности по центральному методу ближайших точек, оценивает информативность признаков при выделении групп и при выделении классов, определяет сходства — различия между однородными таксонами; стандартный размер массива для классификации — 500 наблюдений на 20 признаков, количество однородных таксонов — до 30.

Серия программ «Рубин» предусматривает сравнение заранее заданных таксономических единиц и объединение близких классов, оценку информативности признаков и исключение неинформационных, классифицирование многомерных наблюдений относительно заданной таксономической структуры, определение принадлежности наблюдений к фиксированным эталонным классам.

Программы «Топаз» предназначены для классифицирования зависимых геохимических наблюдений относительно заданных эталонных таксономических единиц.

По всем перечисленным программам предусматривается оценка статистических параметров распределений признаков в однородных классах. Таким образом, комплекс программ позволяет проводить детальный анализ количественной геохимической информации и решать многие поисковые геохимические задачи. G -метод успешно использован для обработки гидрогеохимической, литогеохимической, космохимической, астро-

Величины различий между однородными классами

Класс	Класс				
	2	3	4	5	6
1	4,2	8,7	44	6,9	20
2		5,4	25	2,6	15
3			25	6,5	34
4				16	25
5					4,2

объективная классификация гидрогеохимических наблюдений, по которой выделено четыре однородных гидрогеохимических зоны: I — среднеуральская, в пределах таежно-лесной области; II — восточно-южноуральская, в пределах лесной области; III — южноуральская, в пределах лесостепной области; IV — южноуральская, в пределах степной области:

Зона	Na	Mg	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃	M	pH
I	9	17	11	7,3	21	110	120	6,7
II	40	52	24	29	27	360	350	7,8
III	87	67	60	150	85	350	630	7,5
IV	105	179	105	515	57	550	1200	7,5

Для одного из месторождений Урала строилась классификация наблюдений, представленных спектральными анализами пород. В результате на ЭВМ выделено шесть однородных по микроэлементному составу классов. Генетическая интерпретация их оказалась предельно простой: первый класс — неизмененные плагиограниты, второй — вторично измененные плагиограниты, третий — безрудные кварцевые жилы, четвертый — дайки, пятый — первичный ореол в плагиогранитах, шестой — рудная зона. Наиболее информативными в полученной классификации оказались содержания Cr, V, As и Ni, что связано с составом пород (Cr, V, Ni) и наличием ореольной зоны (As, частично V и Ni).

Анализ межклассовых различий (см. таблицу) показывает, что по комплексу элементов наиболее близки между собой вторично измененные (2) и ореольные (5) плагиограниты, класс неизмененных плагиогранитов (1) ближе всего к измененным (2), дайки (4) наиболее резко отличаются от всех классов и ближе всего к ореольному классу (5), пробы рудной зоны (6) наиболее близки к ореольному образу (5). Все это вполне объяснимо с геолого-генетических позиций.

Следующий пример касается построения классификации лунных пород и стекол по результатам анализов химического состава образцов, доставленных советскими автоматическими станциями и американскими астронавтами, показывает, что выделяются семь основных однородных групп: аортозиты, материевые базальты, криповые базальты, габбробазальты, морские базальты, морские высокотитанистые базальты и калиевые граниты. Классификация лунных стекол, полученных по отдельным местам отбора образцов, аналогична однородным группам, выделенным при анализе всей имеющейся информации, что подтверждает объективность существования однородных по химическому составу таксономических единиц [Гавришин и др., 1980; Coradini e. a., 1976].

Наиболее информативны в классификации стекол из лунного реголита содержания K, Ti и Si. По величине различий между однородными группами можно выделить три типа: аортозитовый (материевый материал), в который входят первые две однородные группы; базальтовый (морской материал), в который входят следующие четыре однородные группы; гранитный материал, по составу соответствующий калиевым гранитам.

Таким образом, приведенные примеры указывают на то, что классификационные программы, основанные на G-методе, могут успешно применяться для повышения эффективности геохимических методов поисков.

физической, дистанционной и других видов информации. Программы продемонстрировали высокую эффективность отыскания однородных классов наблюдений на эталонных тестовых задачах [Гавришин, 1980]. Остановимся коротко на некоторых примерах.

При изучении химического состава (мг/л) грунтовых вод в гранитах и гипербазитах Урала получена

ЛИТЕРАТУРА

- Багров А. А. Об эквивалентном числе независимых данных.— Тр. Гидромет. н.-и. центра, М., 1969, вып. 44.— 11 с.
- Гавришин А. И. Использование искусственных эталонов для оценки методов классификации природных объектов.— В кн.: Оценка качества гидрогеологической и инженерно-геологической информации. Новочеркасск, 1980, с. 100—109.
- Гавришин А. И., Корадини А., Фулькиньони М. Некоторые закономерности формирования химического состава лунных пород и стекол.— Геохимия, 1980, № 3, с. 359—371.
- Коган Р. И., Анохин В. В., Жогина Г. Г. Особенности применения многомерных статистик при решении классификационных геологических задач.— Математические методы исследований в геологии. М.: изд. ВИЭМС, 1972.— 24 с.
- Родионов Д. А., Коган Р. И., Белов Ю. П. Статистические методы классификации геологических объектов.— Математические методы исследований в геологии. М.: изд. ВИЭМС, 1979.— 30 с.
- Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями.— М.: ИЛ, 1956.— 512 с.
- Coradini A., Fulchignoni M., Gavrishin A. I. Classification of Lunar Rocks and Glasses by a new statistical technique.— The Moon, 1976, v. 16, p. 175—190.
- Handbook of Mathematical Functions.— New York, 1972.— 1045 р.

А. А. ШИМАНСКИЙ, Н. А. ШИМАНСКАЯ

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРОБОВАНИЯ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

Развитие и совершенствование методов прикладной геохимии требует организации и проведения серьезных исследований и обобщений, связанных с созданием теоретической базы геохимического опробования. Значительную роль при этом играют вероятностно-статистические обоснования методики измерения при геохимических поисках и интерпретации полученных результатов. Введение таких понятий, как «вероятность концентрации вещества», «закон распределения концентраций» и других, позволяет глубже разобраться в природных закономерностях изучаемых явлений и даст возможность управлять параметрами поисковых и разведочных систем опробования.

Сложность опробования заключается в уникальности каждой отдельной пробы, каждого отдельного измерения. Рассматривая геохимическое опробование как систему сложного измерительного процесса, необходимо также попытаться вскрыть и осмысливать статистическую природу погрешности и на этой основе создать надежную метрологическую обеспеченность измерений в прикладной геохимии. В статье сделана попытка объяснить суть вероятностных и статистических сторон геохимического опробования с целью использования их для повышения достоверности измерений.

При геохимических исследованиях важное место отводится вероятностному описанию изучаемого объекта. В первую очередь необходимо уточнение понятия и определение вероятности. В работе А. В. Вистелиуса [1980] отмечается, что смысл понятия вероятности объясняется двояко: одни авторы подчеркивают прагматическую сторону данного понятия (эпистемологическая вероятность), исходя из анализа свойств объекта в среднем; другие считают, что любое явление, в том числе и геохимическое поле, не сводится к совокупности детерминированных действий, имеющих известную причину. Отсюда и установление понятия онтологической вероятности. Вторая точка зрения глубже отражает суть вещей и явлений, т. е. вероятность присуща явлению. Рассмотрим понятие вероятности концентраций вещества при геохимическом опробовании [Белов, 1966, 1970].

Рассмотрим следующую модель. Имеется геологическое тело H конечного размера T (объема $V \equiv T$, площади $S \equiv T$, длины $L \equiv T$), общая масса полезного вещества в котором M . Пусть тело H разбито на n частей

H_i таких, что сумма всех частей составляет это тело H , т. е.

$$\sum_{i=1}^n H_i = H, \quad \sum_{i=1}^n T_i = T.$$

Масса полезного вещества в каждой части H_i составляет M_i , тогда средняя концентрация вещества в этой части равна

$$\bar{C}_i = \frac{M_i}{T_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

С учетом сказанного будем считать H_i пробами, а функцию $C = C(x, y, z, t)$, которой принадлежат точки $C_i = C_i(x, y, z, t)$, полем концентрации полезного вещества, меняющегося в общем случае в пространстве и во времени.

В рамках данной модели сделаем следующее предположение. Пусть число проб очень велико, т. е. $n \rightarrow \infty$. Тогда $\lim_{n \rightarrow \infty} T_i = 0$, $\lim_{n \rightarrow \infty} M_i = 0$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta C_i = 0$, $i = \overline{1, n}$ (функция $C = C(x, y, z, t)$ непрерывна и дифференцируема в области определения), а опробование называется идеальным [Белов, 1966]. Если C_0 — наперед заданная концентрация такая, что $0 \leq C_0 \leq C_m$, где C_m — наибольшее значение концентрации данного тела H , в пробе H_i , n_0 и n_m — число проб с концентрацией соответственно C_0 и C_m , то отношение n_0/n_m есть вероятность того, что в теле H содержится ровно n_0 проб H_i со средней концентрацией $\bar{C} \leq C_0 \leq C_m$.

В случае идеального опробования ($n \rightarrow \infty$) отношение $\lim_{n \rightarrow \infty} n_0/n_m$ выражает непрерывный закон распределения концентрации вещества.

Далее приходим к следующему выражению:

$$P = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_0}{n_m} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{C_0} dn}{\int_0^{C_m} dn} = \frac{\int_0^{C_0} f dT}{\int_0^{C_m} f dT},$$

где $f = dn/dT$ — плотность опробования (в объеме, на площади, на линии).

Очевидно, что для однозначного определения конкретного объекта кроме известного закона распределения концентрации вещества (зависящего от поля концентрации $C(x, y, z, t)$ и плотности опробования f) необходимо определить автокорреляционную функцию распределения пробных концентраций в теле H . В случае $\bar{C}_i = \text{const}$ поле концентрации равномерно и достаточно знать лишь закон распределения концентрации вещества.

Рассмотрим ряд частных случаев.

1. Случай равномерного опробования. При равномерном опробовании $f = f_0 = \text{const}$. Тогда

$$P_T = \frac{\int_0^{C_0} dT}{\int_0^{C_m} dT} = \frac{T_0}{T_m} = \frac{T_0}{T},$$

есть вероятность того, что в области $T_0 = \sum_i T_i | \bar{C}_i \leq C_0$, $i = \overline{1, n}$ концентрация вещества не превышает наперед заданную величину C_0 . Если $P_T = \frac{dP_T}{dC}$ — дифференциальный закон распределения вероятности кон-

центрации вещества при $f = \text{const}$, то j -й начальный момент по определению

$$M[C^j] = \int_0^{C_m} C^j P_T dC.$$

Отсюда первый начальный момент (математическое ожидание) концентрации определяется как

$$M_T[C] = \int_0^{C_m} CP_T dC = \frac{1}{T} \int_0^{C_m} \frac{dM}{dT} dT = \frac{1}{T} \int_0^{C_m} dM = \frac{M}{T}. \quad (1)$$

Последнее выражение позволяет утверждать, что при равномерном опробовании математическое ожидание величины концентрации равно средней концентрации в теле H .

2. Неравномерное опробование.

$$\text{Пусть } f = kC, \quad k = \text{const}, \quad P_M = \frac{\int_0^{C_0} f dT}{\int_0^{C_m} f dT};$$

$$c = \frac{dM}{dT}, \quad \text{имеем}$$

$$P_M = \frac{\int_0^{C_0} k \frac{dM}{dT} dT}{\int_0^{C_m} k \frac{dM}{dT} dT} = \frac{\int_0^{C_0} dM}{\int_0^{C_m} dM} = \frac{M_0}{M}, \quad \text{где}$$

$P_M = P_M[f = k, C, M]$ — масса полезного вещества в теле H . Здесь плотность вероятности массы полезного вещества $P_M = \frac{dP_M}{dC}$, а j -й начальный момент C при $f = kC$ равен

$$M_M[C^j] = \int_0^{C_m} C^j P_M dC.$$

В результате несложных преобразований получаем следующее соотношение: $\frac{P_M}{P_T} = C \frac{T}{M}$ и, учитывая (1), имеем $\frac{P_M}{P_T} = \frac{C}{M_T[C]}$.

Из этого соотношения можно заключить, что плотности вероятностей при неравномерном и равномерном опробовании относятся так же, как поле концентраций вещества в теле H к средней концентрации того же вещества в теле H при равномерном опробовании.

Несложно установить следующее:

$$M_T[C^j] = M_T[C] M_M[C^{j-1}], \quad (2)$$

откуда можно определить дисперсию концентрации вещества при равномерном опробовании через вероятностные характеристики неравномерного опробования.

Так, при $j = 2$ соотношение (2) принимает вид

$$M_T[C^2] = M_T[C] M_M[C].$$

Тогда $D_T[C] = M_T[C^2] - M_T^2[C] = M_T[C] M_M[C] - M_T^2[C] = M_T[C] (M_M[C] - M_T[C])$.

Вследствие неотрицательности величины дисперсии

$$D_T[C], M_M[C] \geqslant M_T[C].$$

Значит, при идеальном опробовании с плотностью $f = kC$ средняя концентрация вещества не ниже таковой с плотностью опробования $f = \text{const}$, т. е. $M_M[C] \geqslant \frac{M}{T}$.

Среднеквадратическое отклонение $\sigma_T[C] = \sqrt{M_T[C](M_M[C] - M_T[C])}$, коэффициент вариации

$$v_T[C] = \sqrt{\frac{M_M[C]}{M_T[C]}} - 1.$$

3. *Точечное опробование*. Имеется тело H конечного размера T , из которого взято n частей таких, что $\sum_{i=1}^n T_i \leqslant T$, и отдельно взятая часть H_i , $i = 1; n$ имеет очень малый, близкий к нулю, размер $T_i \approx 0$, тогда части H_i называются точечными пробами тела H , а опробование — точечным опробованием.

Теперь рассмотрим следующую модель. Имеется геологическое тело H размером T , разбитое на n частей H_i так, что $\sum_{i=1}^n T_i = T$. В данном случае части H_i не являются точечными пробами, так как размер каждой части имеет конечный, отличный от нуля размер, и будут также геологическими телами, среднюю концентрацию вещества в которых необходимо определить точечным опробованием. Тогда средняя концентрация в теле H будет оцениваться следующими соотношениями:

$$\frac{M}{T} \simeq \frac{\sum_{i=1}^n \bar{c}_i T_i}{T} \quad \text{по формуле прямоугольников};$$

$$\frac{M}{T} \simeq \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{c}_i + \bar{c}_{i+1}) T_i}{2T} \quad \text{по формуле трапеций};$$

$$\frac{M}{T} \simeq \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{c}_i + 4c_{i+1} + c_{i+2}) T_i}{3T} \quad \text{по формуле парабол},$$

где \bar{c}_i — средняя концентрация на участках H_i ; T_i — размер тела H_i .

К сожалению, геохимическое опробование не сводится к совокупности метрологически хорошо разработанных операций и имеет свои качественные особенности. Это своеобразные и сложные способы приведения наблюдаемого объекта (пробы) в условия, позволяющие осуществлять измерения непосредственно интересующей нас величины, начиная от расположения пробы определенного размера и формы в геологическом пространстве отбора ее, обработки и кончая анализом отобранного материала [Дубов, 1974; Каждан и др., 1979].

В процессе геохимического исследования необходимо знать степень точности проведенного измерения, серьезность возникающей при этом погрешности и факторы, вызывающие ее. Это позволит эффективно влиять на ход измерений с целью уменьшения ошибок.

Пусть C_{0i} — концентрация химического элемента в пробе; C_i — истинное значение содержания элемента в пункте отбора пробы; C_{ki} — значение концентрации элемента по контрольной пробе. Проводится двухкратное измерение: основная пробы — контрольная пробы. Тогда $C_{0i} - C_i$ — ошибка опробования (по одному отбору); $C_{ki} - C_{0i}$ — ошибка

контроля по сравнению с основной пробой; $C_{ki} - C_i$ — ошибка контроля по сравнению с истинным значением.

В этом случае ошибка контроля по сравнению с основной пробой составит разницу между ошибкой контроля и ошибкой основной пробы по сравнению с истинной концентрацией, т. е.:

$$C_{ki} - C_{oi} = (C_{ki} - C_i) - (C_{oi} - C_i). \quad (3)$$

Если мы имеем случайные последовательности реализаций по основным и контрольным пробам, то можем построить диаграмму, откладывая контрольные значения вдоль одной оси, а основные — вдоль другой. В идеальном случае, когда контроль подтверждает основное измерение, имеем прямую $C_k = C_0$ (линия совершенных измерений), на практике же получается множество точек, определенным образом группирующихся вдоль этой прямой.

Любая точка, не принадлежащая линии совершенных измерений, представляет контрольное измерение с ненулевой ошибкой; расположение точки над линией означает переоценку основной пробы контролем, расположение точки под линией — недооценку. Подобные диаграммы с успехом могут применяться для иллюстрации соотношения данных по основным и контрольным оценкам, для выявления общей картины несоответствия результатов проведенных измерений.

При этом могут иметь место ошибки 1-го и 2-го рода, причинами возникновения которых могут стать два основных фактора: объективный — недостаточное число проведенных опытов, и субъективный — отношение самого исследователя к полученным результатам.

Ошибка 1-го рода считается ошибкой, возникающей в том случае, когда контрольное измерение выполнено неверно, но считается верным. Ошибка 2-го рода имеет место, если контрольное измерение сделано верно, но забраковывается.

Для количественной оценки точности измерений нам представляется возможным использовать разложение Тейла [1970].

Предположим, что проведено n пар (C_{oi} , C_{ki}) опытов, в результате которых получены данные по основному и контрольному опробованию соответственно. Измерим серьезность ошибки контроля ее квадратом, т. е. рассмотрим выражение

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{ki} - C_{oi})^2, \quad (4)$$

которое представляет собой квадрат ошибки контроля для всех измерений. Данный показатель дает нам комплексную оценку погрешности, не вскрывая причин ее возникновения (условимся считать основное измерение точным, а контрольное — с ошибкой).

Делая предположение об аддитивности модели (4), приходим к первому разложению Тейла:

$$U^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{ki} - C_{oi})^2 = U^M + U^S + U^C, \quad (5)$$

где U^M — составляющая компонента погрешности по математическому ожиданию; U^S — составляющая компонента погрешности по дисперсии; U^C — составляющая компонента погрешности по ковариации. Эти составляющие в нормированном виде ($u^M = \frac{U^M}{U^2}$, $u^S = \frac{U^S}{U^2}$, $u^C = \frac{U^C}{U^2}$) называются долями несоответствия: долей смещения, долей дисперсии, долей ковариации соответственно. Эти доли определяются следующим образом:

$$u^m = \frac{(\bar{C}_k - \bar{C}_0)^2}{U^2}, \quad u^s = \frac{(S_k - S_0)^2}{U^2}, \quad u^c = \frac{2S_k S_0 (1 - r)}{U^2}, \quad (6)$$

где $C_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{ki}$, $C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{0i}$;

$$S_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{ki} - \bar{C}_k)^2, \quad S_0^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{0i} - \bar{C}_0)^2;$$

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{ki} - \bar{C}_k)(C_{0i} - \bar{C}_0)}{S_k S_0}.$$

Выполняется условие нормировки

$$u^m + u^s + u^c = 1. \quad (7)$$

Если доля u^m велика, это означает, что среднее контрольное содержание достаточно сильно отклоняется от среднего основного. В подобных ситуациях необходимо компенсировать такие ошибки, искусственно вводя поправочные коэффициенты.

Ошибка по дисперсии u^s указывает на то, что при оценке содержания не берется во внимание дискретный характер распределения полезного вещества в материале пробы.

Ошибка по ковариации u^c дает информацию о том, что введение поправочных коэффициентов для уточнения оценивания не обосновано, а природа ошибки иная, следует изменить методику определения концентраций или геометрию пробы.

По характеру ошибки делятся на случайные и систематические, поэтому, дифференцированно подходя к анализу этих ошибок, нужно сосредоточить усилия на ликвидации систематических погрешностей.

Г. Тейлом предложена еще одна группа показателей (второе разложение, несимметричное относительно C_k и C_0):

$$U^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{ki} - C_{0i})^2 = (\bar{C}_k - \bar{C}_0)^2 + (S_k - rS_0)^2 + (1 - r^2) S_0^2, \quad (8)$$

где первая компонента остается неизменной, вторая (U^R) — доля регрессии, третья (U^D) — доля возмущения (дисперсия несистематической части).

При достаточно большом n первая и вторая составляющие практически равны нулю. В нормированном виде

$$U^M + U^R + U^D = 1. \quad (9)$$

Пусть имеется n пар (C_{ki}, C_{0i}) , требуется определить, возможно ли улучшение контрольного измерения с помощью линейного выравнивания вида

$$a + bC_{ki}, \quad (10)$$

иначе говоря, с помощью выражения суммы некоторой константы a и произведения любого контрольного измерения C_{ki} и некоторого коэффициента b . Выравнивание такого рода используется при предположении, что мы в будущем будем допускать те же систематические ошибки. Данное выравнивание сводит среднеквадратичную ошибку к доле возмущения.

Описанные модели реализованы в рамках имитационной системы статистического анализа природы возникновения погрешностей при геохимическом опробовании на ЭВМ.

Рассмотренные вероятностные и статистические аспекты геохимического опробования позволяют управлять параметрами опробования при геохимических поисках и должны оценить достоверность опробования проведенных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Белов Б. И. О геохимическом смысле законов распределения концентрации вещества.— В кн.: Математические методы геохимических исследований. М.: Наука, 1966, с. 71—81.
- Белов Б. И. О понятии вероятности концентраций в геохимии.— В кн.: Математические методы в петрологии и геохимии. М.: Наука, 1970, с. 99—105.
- Вистелиус А. В. Основы математической геологии.— Л.: Наука, 1980.— 390 с.
- Дубов Р. И. Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений.— Новосибирск: Наука, 1974.— 278 с.
- Каждан А. Б., Гуськов О. И., Шиманский А. А. Математическое моделирование в геологии и разведке полезных ископаемых.— М.: Недра, 1979.— 168 с.
- Тейл Г. Прикладное экономическое прогнозирование.— М.: Прогресс, 1970.— 510 с.

Н. П. ОРЕХОВ, В. И. ШАРКОВ, А. С. ПАК

ОПЫТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ПГО «БУРЯТГЕОЛОГИЯ»

Развитие вычислительной техники и математизация геологии, начавшаяся в конце 50-х — начале 60-х годов, поставили ряд проблем перед геологами по использованию на практике математических методов и ЭВМ. Геохимические методы, наряду с геофизическими, оказались наиболее подготовленными для математической обработки. Это объясняется объективными факторами — большими объемами элементоопределений, числовым представлением информации, а также поисками путей повышения эффективности геохимических исследований.

Первоначально обработка геохимических материалов проводилась с использованием элементарных статистико-математических методов на малых ЭВМ. В 1975 г. опробована методика обработки геохимических материалов методом многомерных полей, разработанных в СибГЕОХИ и ИГУ. Комплекс программ реализован на ЭВМ БЭСМ-4. Опыт использования этой методики оказался положительным, поэтому после ввода в эксплуатацию в 1978 г. ЭВМ ЕС-1020 в Бурятском геологоуправлении в качестве первоочередной поставлена задача переработки существующей системы на ЕС ЭВМ.

Опробованы комплексы программ по изучению зональности геохимических ореолов, автоматизированной подсистемы АСОД-Прогноз (КазВИРГ), программ, разработанных ЧГУ, систем комплексной интерпретации данных — СКИД (ВостСибНИИГГиМС).

Комплекс программ обработки геохимической информации методом многомерных полей (МП) совершенствуется. В настоящее время он является ведущим при обработке геохимической информации в ПГО «Бурятгеология».

Комплекс включает 14 программ и решает задачи:

1) создание и введение базы данных — ввод с перфокарт, ПЛ и МЛ, запись на магнитные носители (МЛ и МД) исходной информации с контролем на экстремальные значения и логические ошибки перфорации, дозапись, перекомпановку, разделение и слияние массивов. Характеристика массивов содержится в справочной зоне;

2) смысловую обработку информации — интерполяцию в узлы равномерной сети, классификацию (выделение в многомерном пространстве однородных групп-классов), кластер-анализ, элементарную статистику;

3) выдачу результатов — на АЦПУ печатаютсяmonoэлементные карты, карты классов, карты-схемы опробования участков. Кроме того, при решении каждой задачи выдается необходимая справочная информация (справочная зона, таблицы классов и т. п.). Имеется возможность выводить результаты на графопостроитель.

Практически обработка геохимической информации на ЭВМ производится в два этапа.

На первом этапе обрабатывается одномерное (моноэлементное) геохимическое поле, а затем, с учетом полученных результатов, осуществляется переход к совместной обработке геохимической информации по всем заданным элементам.

Целью обработки одномерных полей является получение карт монополей в изолиниях и статистических закономерностей распределения отдельных элементов.

Карты монополей строятся с использованием алгоритма сеточной интерполяции, суть которого заключается в следующем. На заданной площади разбивается квадратная или прямоугольная сеть, расстояние между узлами которой есть шаг интерполяции. Значения исходного поля сносятся в ближайшие узлы заданной сетки и закрепляются. В свободных узлах находятся интерполированные значения путем итерационного процесса вычислений по специальному алгоритму. Шаг интерполяции задается с учетом конкретных геолого-геохимических условий, при необходимости может учитываться анизотропия геохимического поля. Преимуществами такого способа интерполяции являются сохранение значений исходного поля (при правильном задании шага интерполяции) и достаточно полный учет влияния поля в окрестности точки интерполяции.

Карты монополий несут существенно более полную информацию о геохимических особенностях изучаемой площади, нежели привычные карты ореолов. Они позволяют интерпретировать геохимические данные не только с учетом интенсивности аномалий, но и учитывать морфометрические характеристики геохимического поля, корреляцию слабых аномалий и т. п. По своим особенностям карты монополей приближаются к картам геофизических (аэрогеофизических) полей, поэтому при их интерпретации могут быть использованы приемы, разработанные в геофизике и включающие качественное сравнение различных карт (в том числе геофизических) для выделения общих закономерностей, использование статистических и других методов комплексной интерпретации. Карты монополей могут использоваться при проведении геохимических исследований различного масштаба и назначения. Например, детальные карты подробно описывают структуру отдельных ореолов или рудных полей, мелко-масштабные карты позволяют подчеркнуть региональные особенности геохимического поля, выделить рудоконтролируемые структуры. Последние используются при металлогеническом прогнозе.

Второй этап обработки заключается в выделении однородных (с геохимической точки зрения) групп объектов (точек), т. е., по существу, проводится автоматическая классификация исходного геохимического поля с учетом всех заданных элементов. В основе метода лежит модифицированный алгоритм выделения гиперсфер. Для уменьшения влияния размерности исходных данных на результаты классификации проводится их нормирование. Чаще всего нормирование проводится по фоновым или кларковым содержаниям, в результате чего осуществляется переход от содержаний элементов к их контрастностям, т. е. к отношениям исходных данных к фонам или кларкам. Каждая выделенная группа объектов образует определенный класс и несет в себе объективную информацию о природной классификации объектов. Каждый класс характеризуется значениями контрастности образующих его элементов. Критерием для выделения определенного класса являются его «размеры» (допустимый радиус сферы) и вычисленная степень однородности. Для каждого класса с помощью факторного анализа вычисляется ведущая группа элементов (факторов), определяющая степень участия их в образовании этого класса. Построенные таким образом классы и их характеристики образуют эталонное пространство. Затем в каждой точке площади, совпадающей с узлом интерполяционной сетки, с учетом карт монополей, строится многомерный вектор и определяется, с каким из эталонных классов он совпадает точнее. В результате получается карта классов, отражающая сово-

купную характеристику многомерного геохимического поля. Такая карта несет в себе принципиально новую информацию и требует специальных приемов интерпретации.

Наиболее интересным и сложным моментом в интерпретации карт многомерных полей является геологическая идентификация выделенных классов. Дело в том, что выделенные в процессе классификации однородные группы не в полной мере соответствуют природным геологическим образованиям. С одной стороны, возможно появление так называемых «ложных» классов, не соответствующих природным объектам (обычно они возникают на границах аномальных зон), а с другой — объекту могут соответствовать несколько различных классов. Поэтому геологическая интерпретация требует детального учета геолого-геохимической обстановки, изучения и сравнения геохимических характеристик выделенных классов. Для этой цели могут использоваться формальные методы, например кластер-анализ. Изучение ведущих элементов в классах позволяет оценивать природные геохимические ассоциации, более детально изучать структуру геохимического поля и существенную взаимосвязь между природными элементами, находить закономерности их изменения.

Примеры интерпретации моно- и полиэлементных карт не рассматриваются в данной статье. Однако имеет смысл кратко отметить результаты опытов перечисленных выше пакетов программ.

Автоматизированная система АСОД-Прогноз позволяет создать универсальную базу данных достаточно сложной структуры, в которой одновременно используются геолого-геохимические и геофизические показатели, имеет большой набор программных модулей для смысловой обработки. Последняя ведется в диалоговом режиме. Схема обработки может зависеть в зависимости от поставленных задач, при этом от пользователя требуются достаточно высокие профессионально-технические навыки. Применение системы эффективно для решения специальных тематических и научных задач.

Методика Григоряна и других использована при проведении тематических исследований для оценки зональности первичных и вторичных ореолов, а также уровня эрозионного среза одного из редкometалльных месторождений Бурятской АССР.

СКИД широко применяется для комплексной обработки геофизических данных, в том числе аэрогамmasпектрометрии. Последняя является, по существу, дистанционным аналогом геохимической съемки. Эта система позволяет решать вопросы классификации, получать карты перспектив территории с помощью программ распознавания, оценивать информативность различных методов. С помощью этих программ по ряду участков по аэрогамmasпектрометрии получены интересные результаты, поэтому планируется начать обработку наземных геохимических материалов с помощью комплекса СКИД.

Автоматизированная подсистема, разработанная в ЧГУ, находится в стадии освоения и опробования на эталонных материалах. Исследование применимости всех перечисленных комплексов в условиях Бурятии продолжается.

Помимо указанного для решения отдельных задач по математической обработке геохимической информации используется большой набор программ на ЭВМ Наира-С, позволяющий вычислять элементарные статистики для различных законов распределения, проводить корреляционный, регрессионный, дискриминантный анализ и другие расчеты.

Математическая обработка геохимической информации в ПГО «Бурят-геология» организована следующим образом.

Опытно-методическая партия геофизической экспедиции, в состав которой входит Вычислительный центр, занимается непосредственно математическим обеспечением и эксплуатацией комплексов программ, их доработкой и совершенствованием, ведет самостоятельные разработки по программному и математическому обеспечению АСОИ-Геохимия, кон-

сульттирует по вопросам автоматизированной обработки, в том числе по интерпретации получаемых результатов.

Геолого-геохимическим обеспечением АСОИ-Геохимия занимается специальная группа, организованная в составе Центральной геологопоисковой экспедиции. Она решает вопросы подбора и подготовки материалов для обработки, геохимической интерпретацией результатов, разработкой методики такой интерпретации; подготовкой специалистов-геохимиков для работы с материалами АСОИ-Геохимия, осуществляет непосредственную связь с производственными подразделениями, разрабатывает стандарты и оценивает геологическую эффективность использования различных комплексов программ.

Тесное взаимодействие этой группы и ВЦ, их совместная плановая работа обеспечивает наиболее эффективное функционирование АСОИ-Геохимия. Опыт показал неплохую технологичность пакета программ ММП и высокую эффективность получаемых материалов. Проведены специальные опытные работы по оценке возможностей работы систем с различными наборами исходных данных и в различных геолого-геохимических условиях.

С учетом сделанного намечен план совершенствования и развития автоматизированной подсистемы. Главное внимание здесь уделяется проблемам устойчивого выделения однородных эталонных классов по различным наборам исходных данных, совершенствования алгоритма интерполяции, улучшения технологичности и производительности систем, совершенствования информационной базы и пополнения программ новыми модулями смысловой обработки.

Л. А. ФИЛИППОВА

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КАРТЫ ХАПЧЕРАНГИНСКОГО РАЙОНА (ЗАБАЙКАЛЬЕ) ПО ПОТОКАМ РАССЕЯНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ ОПРОБОВАНИЯ

В практике поисковых работ широко используется метод поисков по потокам рассеяния. Опыт показывает, что геохимические карты, составленные по данным опробования потоков рассеяния, способны решать такие важнейшие поисковые задачи, как: установление региональных закономерностей пространственного размещения месторождений полезных ископаемых на исследуемой территории; выявление геохимической и металлогенической специализации площадей; выявление на исследуемой территории всех типов рудных месторождений; обнаружение новых площадей (районов, зон, узлов, участков и т. п.). При этом решающее значение имеет плотность опробования потоков рассеяния.

С целью изучения этого вопроса нами для Хапчерангинского рудного района составлены геохимические карты при различной плотности опробования илистых (фракция $< 0,5$ мм) отложений водотоков: 1) 9 проб на 1 км² — плотность, с которой проводилась съемка в районе; 2) 2 пробы на 1 км²; 3) 1 проба на 1 км²; 4) 1 проба на 5 км². Последние три плотности достигались путем механического разряжения фактического опробования. Для второй и третьей плотности составлялись выборки через определенное число проб: для плотности 2 пробы на 1 км² выбиралась каждая пятая проба, начиная с первой (вариант I), и каждая пятая, начиная с третьей (вариант II), для плотности 1 проба на 1 км² выбиралась каждая десятая проба, начиная с первой. Пробы для четвертой (1 проба на 5 км²) плотности определялись исходя из карты фактического опробования масштаба 1 : 50 000, на которую наложена сетка с клеткой 2,25 × 2,25 см, т. е. соответствующей по площади 5 км². В выборку включалась та проба, которая ближе всего находилась к центру такой клетки на

карте. Количество проб в каждой выборке, таким образом, равнялось: 5500 — для плотности 9 проб на 1 км² (фактически отобранное количество проб при съемке), 1200 — для плотности 2 пробы на 1 км², 600 — для плотности 1 проба на 1 км² и 120 — для плотности 1 пробы на 5 км². Занятая площадь составляет 600 км².

В основу карт положены результаты спектрального приближенно-количественного анализа, проведенного на приборе ДФС-13 с применением просыпки. Определялись содержания Sn, Pd, Zn, Cu, Ag, As, Bi, Mo, W, Ni, Co, Y, La, Zr и других элементов.

Геохимические карты построены на ЭВМ по методу многомерных полей [Евдокимова, Китаев, 1973; Евдокимова, 1978], который обеспечивает автоматизированное построение моно- и полиэлементных карт. Последние представляют собой поля геохимических классов, отражающих природные ассоциации элементов.

Особенности и достоинства принятого способа построения карт по потокам рассеяния заключаются в следующем. При съемках по речным потокам рассеяния данные относятся лишь к гидросети, т. е. содержания элементов располагаются вдоль рек. При построении карты производится интерполяция этих содержаний на междуречные пространства и увязка их между соседними реками. В результате на карте получается цельное (площадное) и рельефное изображение различных геохимических полей любой, даже самой слабой (например, с превышением над фоном в 2—1,5 раза и менее) контрастности. Последнее обстоятельство очень важно при поисках по потокам рассеяния, так как концентрации элементов в них обычно невелики. Особенno это ценно при малой плотности опробования, когда аномальные объекты фиксируются малым количеством проб и попадание на пробу с высокими содержаниями элементов маловероятно. Кроме того, при обработке данных и построении карт, за исключением представлений о фоне, не вводится никаких предварительных или промежуточных гипотез, в том числе и направлений интерполяции, которые могли бы повлиять на конечные результаты. Поэтому карты отражают достаточно объективную геохимическую картину изучаемой площади.

На рис. 1—5 приведены геохимические карты Хапчерангинского рудного района для каждой из указанных выше плотностей опробования потоков рассеяния. Они представлены картами классов и в качестве примера моноэлементных карт — картой концентраций олова. Район характеризуется наличием оловянных, оловянно-полиметаллических и полиметаллических месторождений и рудопроявлений, которые представлены оловянными штокверками, кассiterит-кварцевыми, кассiterит-сульфидными и сфалерит-галенитовыми жилами. Все месторождения и рудопроявления в районе локализуются в зоне широтного разлома (см. рис. 1), который по существующим представлениям является рудоконтролирующей структурой.

Геохимическая съемка территории рудного района показала, что при поисках по потокам рассеяния с плотностью опробования в среднем 9 проб на 1 км² фиксируются все известные на площади месторождения и отдельные рудопроявления (рис. 1). При этом различным типам оруднения соответствуют определенные типы геохимических аномалий, отличающихся ассоциациями элементов. Кроме того, на карте видно, что расположение всех аномалий известных месторождений и рудопроявлений контролируется двумя направлениями — широтным, с аномалиями оловянного и полиметаллического типов (классы 3—6, 11), и северо-западным, характеризующимся ассоциациями элементов (классы 8—10) (подробнее см. [Филиппова, 1976; Поликарпочкин и др., 1978]).

Геохимическая карта, составленная при плотности опробования 2 пробы на 1 км² (рис. 2), показывает результаты, близкие фактической съемке, при плотности 9 проб на 1 км². Все известные месторождения обозначаются отчетливыми аномалиями. Выявляются также и новые перспективные участки (5, 9, 10). Участки аномальных классов проявляются и в северо-восточной части района.

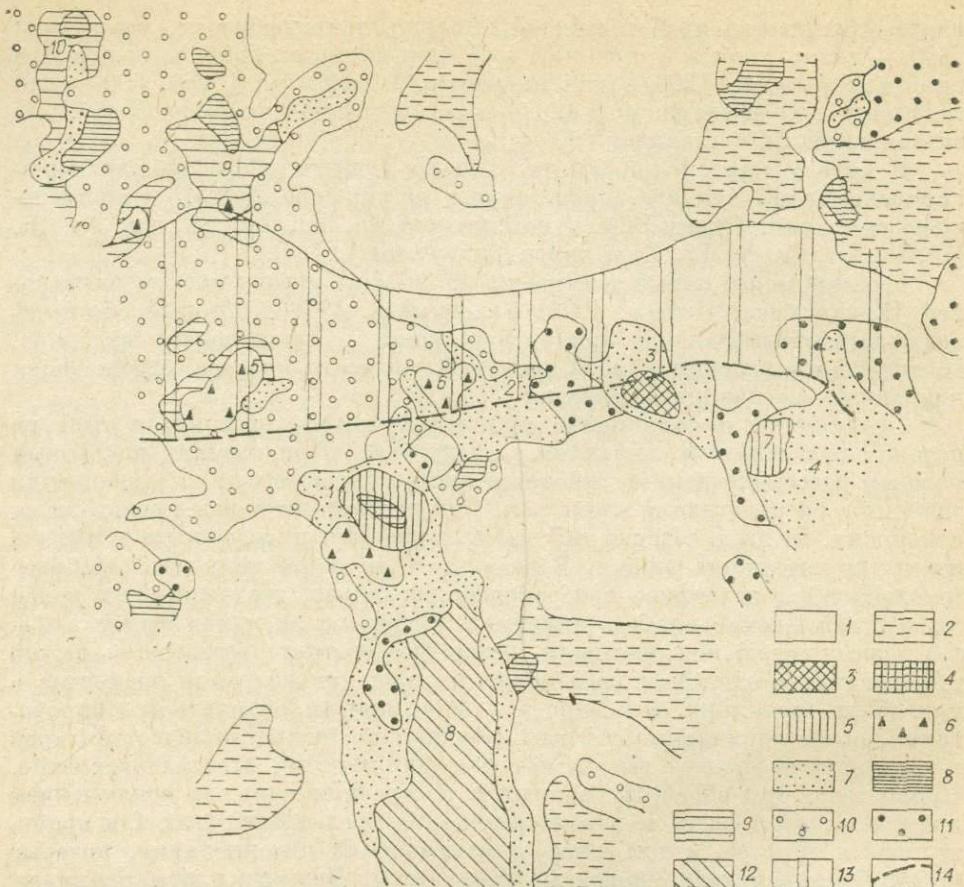


Рис. 1. Геохимическая карта Хапчрангинского рудного района, составленная по потокам рассеяния при плотности опробования 9 проб на 1 км².

1—12 — геохимические классы (здесь и далее в знаменателе — коэффициент контрастности, КК): 1 — фон (КК-1—1,3); 2 — фон (КК < 1 для большинства элементов); 3 — $\frac{W}{Bi}$ 10—30

Bi	Sn	As	Ag	Pb	Cu	Zn	4	Bi	Ag	As	W	Sn	Cu	Pb	Zn	Y	Bi	Ag
19—20	14	10—12	5—8	3—4	3	2—3	4	56	19	10	8	4	2	5	7—26	7—28		
Pb	Sn	Cu	Zn	As			6	Ag	Pb	26—77	3—7	2—3	2—4	2—3	1,8—2,3	Zn	Sn	
3—6	2—3	2—4	2—2,5	1,4—2,2			Y	Li	La	Ag	Zr	Co	Ni					
7—5—12	3—5	2—4	2—3	1,4—2			8	5—30	3—14	2—17	2—5	1,7—2		9—13—29				
Y	La	Zr	Cu	Co	Ni		10	Ag	Y	Bi	Cu	W	Zr	La				
4—6	3—3,4	2—3	1,5—2,6				5	5—6	2,2—2,3	2,1—2,4	1,8		1,7	3—6	2—4			
Pb	Cu	Zn	Sn				11											

12 — техногенный класс; 13 — блок палеозойских филлитов и филлитовидных сланцев; 14 — субширотный разлом. Здесь и далее на рисунках цифрами обозначены месторождения: 1 — оловянно-полиметаллическое, 2 — полиметаллическое, 3 — оловянно-редкометалльное, 4 — оловянно-полиметаллическое; аномалии: 5, 6 — полиметаллические, 7 — оловянно-редкометалльная, 8 — техногенная, 9, 10 — редкоземельные.

Классы элементов в пределах каждой аномалии представляют практически те же геохимические ассоциации, что и при фактической плотности опробования. Некоторое смешение элементов наблюдается в классах, отвечающих оловянной и полиметаллической минерализациям. Однако формационная принадлежность аномалий в классах проявляется еще отчетливо.

Из сравнения геохимических классов видно, что в аномалиях от месторождений типа касситерит-кварцевых жил, штокверков и оловоносных грейзенов месторождения 3,4 геохимическую ассоциацию, как и при обработке по всем 5500 пробам, составляют Bi, W, As, Sn, Cu, присутствуют также Ag, Pb и Zn (класс 3). При переходе к полиметаллическим аномалиям (южная часть месторождений 1,2 и аномалий 5, 6) в классах резко увеличивается роль Ag, заметно уменьшаются содержания Bi, Sn,

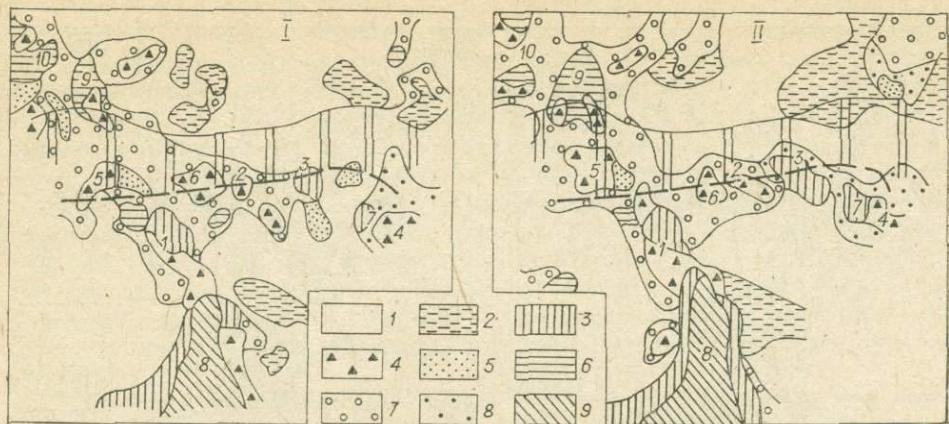


Рис. 2. Геохимические карты Хапчерангинского рудного района по потокам рассеяния при плотности опробования 2 пробы на 1 км².

I — вариант, когда в выборку для решения отбиралась каждая 5-я проба, начиная с первой; II — вариант, когда в выборку для решения отбиралась каждая 5-я проба, начиная с третьей. 1—9 — геохимические классы; для варианта I: 1 — фон (KK-1—1,5); 2 — фон (KK < 1 для Cu, Mo, Zr, иногда Ag, Zn, Sn, Bi и др.); 3 — $\frac{\text{Bi}}{10-36}$, $\frac{\text{As}}{2-15}$, $\frac{\text{Ag}}{3-14}$, $\frac{\text{W}}{3-11}$, $\frac{\text{Sn}}{3-10}$, $\frac{\text{Pb}}{3-4}$, $\frac{\text{Cu}}{2-7}$, $\frac{\text{Zn}}{2-3}$; 4 — $\frac{\text{Ag}}{15-76}$, $\frac{\text{Pb}}{3-10}$, $\frac{\text{Bi}}{2-6}$, $\frac{\text{Zn}}{2-4}$; 5 — $\frac{\text{W}}{4-7}$ до 9, $\frac{\text{Ag}}{2-2,4}$, $\frac{\text{Bi}}{2-2,4}$, $\frac{\text{Pb}}{2-2,4}$, $\frac{\text{Cu}}{2-2,4}$, $\frac{\text{Zn}}{2-2,4}$, $\frac{\text{Y}}{2-2,4}$; 6 — $\frac{\text{Ag}}{7-9}$, $\frac{\text{Y}}{3-7}$, $\frac{\text{La}}{2-5}$ до 6, 2—3; 7 — $\frac{\text{Ag}}{2-8}$, $\frac{\text{Bi}}{1,6-3,5}$, $\frac{\text{Zn}}{2-2,0}$, $\frac{\text{Y}}{2-2,0}$; 8 — $\frac{\text{Ag}}{7,8}$, $\frac{\text{Bi}}{1,8-2,0}$, $\frac{\text{Zn}}{2-2,0}$; 9 — техногенный класс; для варианта II: 1 — фон (KK-1—1,7); 2 — фон (KK-1 для Ag, Cu, Zn, Mo и др.); 3 — $\frac{\text{Bi}}{9-26}$, $\frac{\text{Sn}}{6-18}$, $\frac{\text{Ag}}{9-5}$, $\frac{\text{W}}{5-6}$, $\frac{\text{Pb}}{3-9}$; 4 — $\frac{\text{Ag}}{14-32}$, $\frac{\text{Pb}}{3}$, $\frac{\text{Bi}}{2-4}$, $\frac{\text{Y}}{2}$, $\frac{\text{Zn}}{2}$; 5 — $\frac{\text{W}}{4}$, $\frac{\text{Ag}}{3}$, $\frac{\text{Y}}{2}$, $\frac{\text{Ni}}{2}$, $\frac{\text{Bi}}{2}$, $\frac{\text{Zn}}{2}$; 6 — $\frac{\text{Y}}{3-23}$, $\frac{\text{Ag}}{2-13}$, $\frac{\text{La}}{3-9}$, $\frac{\text{W}}{3-4}$, $\frac{\text{Zn}}{3-4}$; 7 — $\frac{\text{Ag}}{2-7}$, $\frac{\text{Bi}}{2-3}$, $\frac{\text{Y}}{2}$, $\frac{\text{Ni}}{2}$, $\frac{\text{Pb}}{2}$, $\frac{\text{Sn}}{2}$; 8 — $\frac{\text{Ag}}{2-7}$, $\frac{\text{Bi}}{2-5}$, $\frac{\text{Ni}}{2-3}$, $\frac{\text{Pb}}{2}$, $\frac{\text{Sn}}{2}$; 9 — техногенный класс.

Cu, падают до фона W и As, хотя Pb и Zn остаются почти без изменений (класс 4). Отчетливо проявляется редкоземельная специфика ассоциаций (класс 6). Сохраняется также в распределении аномальных классов по площади контролирующая роль субширотной и северо-западной зон. При этом классы, объединяющие аномалии в непрерывные зоны (кл. 8 и 7 соответственно), по составу остаются такими же, как и при фактической плотности (см. рис. 1, классы 11 и 12).

Сравнение карт I и II (см. рис. 2) показывает, что при разных вариантах выборки проб результаты обработки не обнаруживают принципиальных расхождений.

Разрежение плотности опробования до двух проб на 1 км² не вызывает существенных изменений также в распределении отдельных элементов. Распределение при данной плотности опробования (рис. 3, Б и В) до деталей повторяет особенности распределения при плотности 9 проб на 1 км² (см. рис. 3, А).

На рис. 4 (А) можно видеть, что при уменьшении плотности опробования до одной пробы на 1 км² фиксируются не все, а наиболее крупные

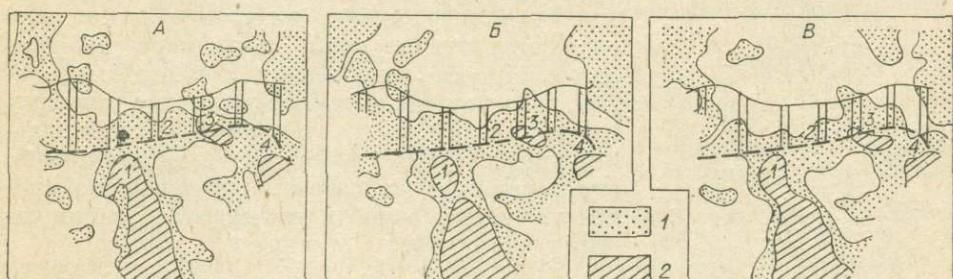


Рис. 3. Карты распределения олова по потокам рассеяния при плотности опробования 9 проб на 1 км² (А) и 2 пробы на 1 км² (Б — вариант I, В — вариант II). 1, 2 — концентрации олова, %: 1 — 0,0004—0,001; 2 — 0,001—0,06.

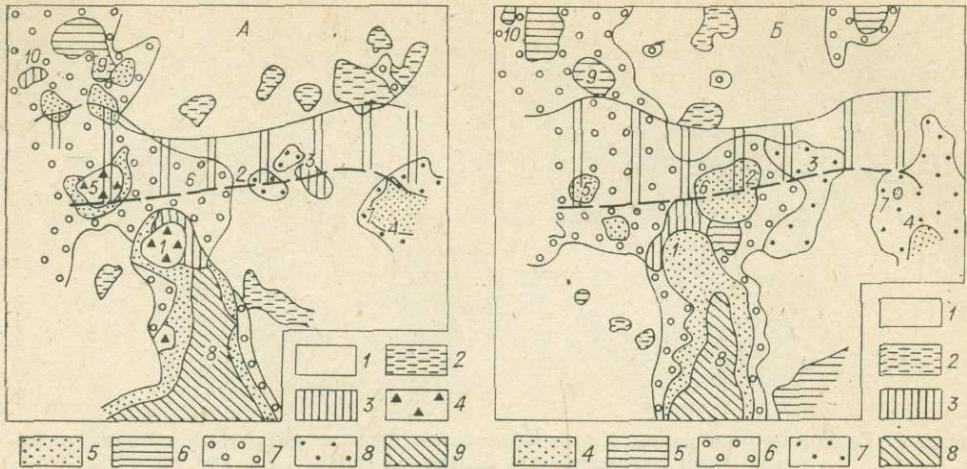


Рис. 4. Геохимические карты Хапчерангинского рудного района по потокам рассеяния при плотности опробования 1 пробы на 1 км² (А) и 1 пробы на 5 км² (Б).

1—9—геохимические классы; для А: 1 фон (КК-1—1,5); 2—фон (КК-1 для большинства элементов); 3— $\frac{5}{2}$ — $\frac{12}{1}$; 6— $\frac{9}{5}$ — $\frac{8}{8}$; 3— $\frac{2}{3}$ — $\frac{3}{2}$; 4— $\frac{\text{Ag}}{31}$ — $\frac{\text{Pb}}{3}$ — $\frac{\text{Bi}}{2}$ — $\frac{\text{Ni}}{3}$ — $\frac{\text{Y}}{1}$ — $\frac{\text{Co}}{2}$ — $\frac{\text{Mo}}{3}$ — $\frac{\text{Zn}}{2}$ — $\frac{\text{Cu}}{5}$; 5— $\frac{\text{Ag}}{8}$ — $\frac{\text{Pb}}{16}$ — $\frac{\text{Bi}}{2}$ — $\frac{\text{Ni}}{16}$ — $\frac{\text{Y}}{5}$ — $\frac{\text{Co}}{2}$ — $\frac{\text{Mo}}{5}$ — $\frac{\text{Zn}}{16}$ — $\frac{\text{Cu}}{5}$; 6— $\frac{\text{Ag}}{4}$ — $\frac{\text{Pb}}{7}$ — $\frac{\text{Bi}}{6}$ — $\frac{\text{Ni}}{7}$ — $\frac{\text{Y}}{4}$ — $\frac{\text{Co}}{3}$ — $\frac{\text{Mo}}{4}$ — $\frac{\text{Zn}}{7}$ — $\frac{\text{Cu}}{4}$; 7— $\frac{\text{Ag}}{2}$ — $\frac{\text{Pb}}{7}$ — $\frac{\text{Bi}}{6}$ — $\frac{\text{Ni}}{7}$ — $\frac{\text{Y}}{3}$ — $\frac{\text{Co}}{2}$ — $\frac{\text{Mo}}{3}$ — $\frac{\text{Zn}}{3}$ — $\frac{\text{Cu}}{2}$; 8— $\frac{\text{Ag}}{7}$ — $\frac{\text{Pb}}{2}$ — $\frac{\text{Bi}}{16}$ — $\frac{\text{Ni}}{16}$ — $\frac{\text{Y}}{2}$ — $\frac{\text{Co}}{2}$ — $\frac{\text{Mo}}{16}$ — $\frac{\text{Zn}}{16}$ — $\frac{\text{Cu}}{16}$; 9—техногенный класс; для Б: 1—фон (КК-1—2, иногда Bi до 3); 2—фон (КК < 1 для большинства элементов); 3— $\frac{\text{Ag}}{15}$ — $\frac{\text{Pb}}{16}$ — $\frac{\text{Bi}}{3}$ — $\frac{\text{Ni}}{4}$ — $\frac{\text{Zn}}{2}$ — $\frac{\text{Sn}}{4}$ — $\frac{\text{Y}}{2}$ — $\frac{\text{Bi}}{2}$ — $\frac{\text{Pb}}{4}$ — $\frac{\text{W}}{4}$ — $\frac{\text{Ag}}{3}$ — $\frac{\text{Zn}}{2}$ — $\frac{\text{Sn}}{3}$ — $\frac{\text{Cu}}{2}$; 4— $\frac{\text{Ag}}{5}$ — $\frac{\text{Pb}}{4}$ — $\frac{\text{Bi}}{3}$ — $\frac{\text{Ni}}{4}$ — $\frac{\text{Zn}}{2}$ — $\frac{\text{Sn}}{4}$ — $\frac{\text{Y}}{2}$ — $\frac{\text{Bi}}{3}$ — $\frac{\text{Pb}}{4}$ — $\frac{\text{W}}{4}$ — $\frac{\text{Ag}}{3}$ — $\frac{\text{Zn}}{2}$ — $\frac{\text{Sn}}{3}$ — $\frac{\text{Cu}}{2}$; 5— $\frac{\text{Ag}}{7}$ — $\frac{\text{Pb}}{38}$ — $\frac{\text{Bi}}{3}$ — $\frac{\text{Ni}}{38}$ — $\frac{\text{Y}}{3}$ — $\frac{\text{Co}}{16}$ — $\frac{\text{Mo}}{16}$ — $\frac{\text{Zn}}{16}$ — $\frac{\text{Cu}}{16}$; 6— $\frac{\text{Ag}}{6}$ — $\frac{\text{Pb}}{9}$ — $\frac{\text{Bi}}{6}$ — $\frac{\text{Ni}}{9}$ — $\frac{\text{Y}}{8}$ — $\frac{\text{Co}}{2}$ — $\frac{\text{Mo}}{2}$ — $\frac{\text{Zn}}{2}$ — $\frac{\text{Cu}}{2}$; 7— $\frac{\text{Ag}}{6}$ — $\frac{\text{Pb}}{9}$ — $\frac{\text{Bi}}{6}$ — $\frac{\text{Ni}}{9}$ — $\frac{\text{Y}}{2}$ — $\frac{\text{Co}}{2}$ — $\frac{\text{Mo}}{2}$ — $\frac{\text{Zn}}{2}$ — $\frac{\text{Cu}}{2}$; 8—техногенный класс.

аномалии (1, 3, 5, 7, 9). При этом в классах еще сохраняются признаки их формационной принадлежности.

Дальнейшее разрежение плотности до одной пробы на 5 км² (см. рис. 4, Б) приводит к выявлению главным образом субширотной и северо-западной контролирующих рудных зон, хотя в ослабленном виде обозначаются и конкретные аномалии — 1, 5, 7, 9. Часть аномалий, выявляющихся при большей плотности опробования, исчезает.

В отличие от предыдущих случаев в классах, характеризующих эти аномалии и рудные зоны, наблюдается значительное смешение типов рудной минерализации, что затушевывает их металлогеническую специфику.

Сильно падает в данном случае и контрастность аномальных элементов в классах. Это происходит закономерно по мере уменьшения плотности опробования (сравни классы на рис. 1, 2 и 4).

В распределении отдельных элементов при плотности опробования одна пробы на 1 и 5 км² (рис. 5) отмечаются те же особенности, что и в распределении классов, — четко обозначаются рудные зоны, но по мере уменьшения плотности опробования локальные аномалии либо исчезают, либо происходит уменьшение их контрастности, так как высокоаномальные пробы редки, в выборке с малой плотностью опробования не попадают и одновременно происходит расплывание и расширение границ частных аномалий.

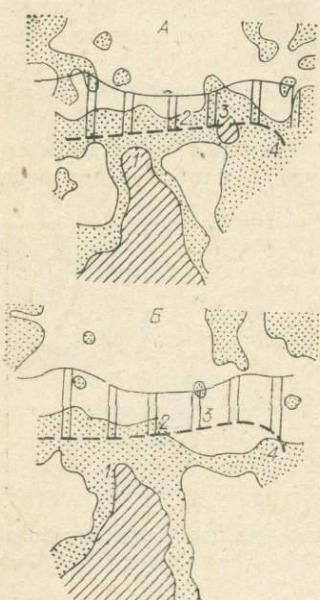


Рис. 5. Карты распределения олова по потокам рассеяния при плотности опробования 1 пробы на 1 км² (А) и 1 пробы на 5 км² (Б).

Усл. обозн. см. на рис. 1 и 3.

Из приведенных данных вытекает следующее. Задача, стоящая перед поисками 1 : 50 000 масштаба — выявление отдельных месторождений и определение типов их рудной минерализации, — успешно решается геохимической картой по потокам рассеяния уже при плотности опробования 1—2 пробы на 1 км², что соответствует масштабу 1 : 200 000. Большая плотность опробования, порядка 10 проб на 1 км² (опробование по рекам через 100 м), необходима для локализации и количественной оценки (с подсчетом продуктивностей) зафиксированных в потоках рассеяния аномалий. Чем больше плотность опробования, тем точнее будет произведена эта оценка. Кроме того, карту с повышенной плотностью опробования потоков рассеяния целесообразно составлять для выявления месторождений, залегающих в трудных поисковых условиях (залесенные или заболоченные площади, площади с мощным чехлом рыхлых отложений и т. п.).

Региональные поисковые задачи — установление закономерностей размещения месторождений, обнаружение крупных аномальных площадей (районов, узлов, зон и др.) — успешно решаются при гораздо меньшей плотности опробования. Выше показано, что на карте, составленной с плотностью опробования одна пробы на 5 км², вполне надежно выявляются рудные зоны — субширотная и северо-западная. При меньшей плотности опробования карты не строились. Но, учитывая четкость результатов, полученных на карте с плотностью одна пробы на 5 км², можно полагать, что в целом рудный район будет выделяться на карте при еще меньшей плотности опробования, порядка одна пробы на 10 км² и меньше. Эти цифры соответствуют оценкам плотности опробования по потокам рассеяния, приводимым другими исследователями [Лопаткина и др., 1972; Armour-Brown, Nichol, 1970; Garrett, Nichol, 1967]. Геохимические карты с малой плотностью опробования целесообразно составлять для слабо изученных больших по размерам территорий с неопределенными рудными перспективами.

В заключение подчеркнем, что получение высокинформативных геохимических карт по потокам рассеяния, особенно при малой плотности их опробования, возможно при условии применения для обработки данных и построения карт современных математических методов, типа многомерных полей, с использованием ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

- Евдокимова В. Н. Автоматизированная система обработки геолого-геохимической информации методом многомерных полей.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск: Наука, 1978, с. 3—26.
- Евдокимова В. Н., Китаев Н. А. Обработка данных геохимических съемок на основе анализа рудных полей.— В кн.: Геохимические поиски рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке по вторичным ореолам рассеяния. Иркутск, 1973, с. 212—225.
- Лопаткина А. П., Квашинская Н. В., Комаров В. С. и др. Геохимическое изучение твердого и жидкого стока малых рек с целью мелкомасштабного прогнозирования.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, 1972, с. 273—285.
- Поликарпочкин В. В., Филиппова Л. А., Евдокимова В. Н. Потоки рассеяния Халчера-Гангисского рудного района (Забайкалье).— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск: Наука, 1978, с. 64—74.
- Филиппова Л. А. Формационные типы геохимических аномалий в потоках рассеяния Халчера-Гангисского рудного района (Восточное Забайкалье).— В кн.: Ежегодник-1975 СибГЕОХИ. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1976, с. 141—145.
- Armour-Brown A., Nichol J. Regional geochemical reconnaissance and the location of metallogenic provinces.— Econ. Geol., 1970, v. 64, N 3, p. 312—330.
- Garrett R. G., Nichol J. Regional geochemical reconnaissance in Eastern Sierra Leone.— Trans. Mining and Metallurgy, 1967, sec. 13, v. 76, p. 97—112.

Э. Ф. ЖБАНОВ, В. И. ИГНАТОВИЧ, В. С. АФАНАСЬЕВ

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ
НА ЭВМ ДАННЫХ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ
ДЖИДИНСКОГО РУДНОГО РАЙОНА

Излагаются результаты обработки на ЭВМ данных площадной геохимической съемки по потокам рассеяния в Джидинском рудном районе на площади 6000 км² (60000 проб) методом многомерных полей (МП) [Китаев, Евдокимова, 1976; Евдокимова, 1978; Поликарпочкин, 1980].

Район сложен осадочно-вулканогенными и интрузивными образованиями нижнего палеозоя и мезозоя, а также кайнозойскими базальтами. Основным элементом геологической структуры является раннепалеозойский Джидинский синклиниорий. Металлогеническую специализацию района определили молибденовые и отчасти вольфрамовые месторождения, сформировавшиеся в позднем палеозое и раннем мезозое [Игнатович, 1980].

Проведен эмиссионный спектральный полуколичественный анализ проб (ДФС-8) на 26 элементов. На ЭВМ обработаны анализы по 15 элементам, частота встречаемости которых 80—100%: титан, марганец, хром, никель, кобальт, ванадий, молибден, медь, свинец, цинк, олово, цирконий, иттрий, стронций, барий. Фоновые значения определены на основе всего объема анализов. Поиски по потокам рассеяния проведены с целью пересъемки и доизучения старого рудного района, работы в котором закончились 15 лет назад.

Сейчас все более насущной становится задача изучения закономерностей целостной картины геохимического поля, построенной на базе равномерного и плотного геохимического опробования всего района. Данные по потокам рассеяния — достаточно представительный материал для анализа пространственного размещения геохимических аномалий на относительно большой территории. При этом надо учесть следующие ограничительные моменты. Результаты пересъемки распространяются не на весь район, а только на площади открытых категорий — степь, лесостепь, речные врезы, узкие водоразделы. Их удельный вес в данном районе наиболее высок. Суммарно эти площади закрытых категорий (долины наиболее крупных рек, подрудные отложения и долинные базальты), занимающие остальную часть территории, остались неописанными.

На ЭВМ отстроены картографические геохимические материалы двух видов — карты монополей и карты классов.

Карты монополей отражают картину распределения элементов при плотности опробования 10 проб на 1 км². Распечатываются все концентрации элементов. Это дает возможность «отбить» не только рудные объекты, но и обнаружить некоторую корреляцию между геохимическим и геологическим полями. На монополях, получаемых с помощью ЭВМ, это делается более полно по сравнению с картами положительных рудных аномалий, составленных вручную. Часть комплексов пород (ультрабазиты, некоторые свиты вулканогенно-терригенных палеозойских толщ) хорошо обозначается на картах монополей повышенными или пониженными концентрациями определенных элементов. Карты монополей помогают выявить даже некоторые неточности геологических карт. Так, часть положительных аномалий никеля не согласовывалась с показанными на карте известняками. Более детальное изучение этого участка показало, что он сложен преимущественно песчаниками и гравелитами, гравий и галька в некоторых представлена основными породами.

На картах монополей разнотиповые месторождения четко фиксируются положительными аномалиями главных рудных элементов. Конtrastность их в 10—100 раз превышает региональный геохимический фон (РГФ). Формационный тип (редкометалльно-вольфрам-молибденовый и

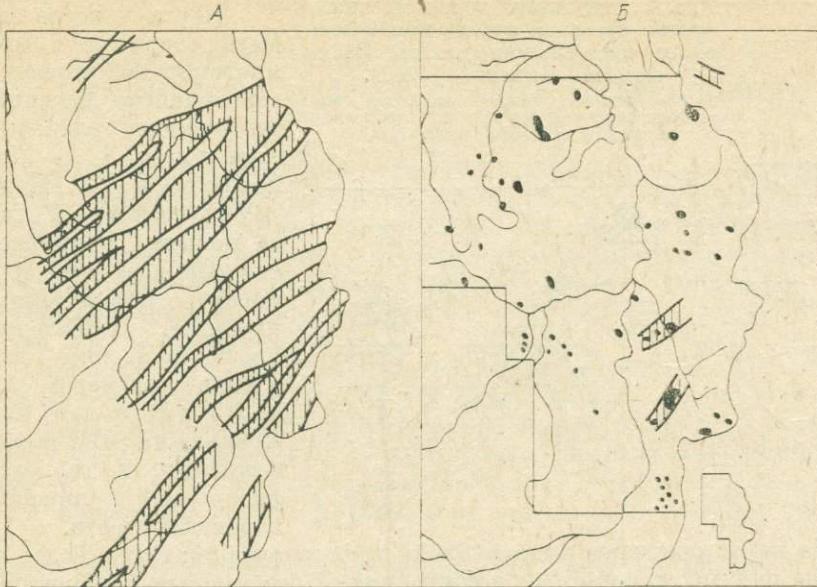


Рис. 1. Схемы Джидинского рудного района.

А — главные металлогенические зоны по Е. Е. Батуриной; Б — расположение молибденовых аномалий, отстроенных на ЭВМ.

молибденовый) определяется по наличию или отсутствию таких элементов, как свинец, медь и др., но для достоверного выяснения его необходим сравнительный анализ всего множества полученных по району mono-элементных карт.

Новым фактом оказалось то, что в расположении геохимических аномалий почти всех элементов не наблюдалось столько четких северо-западных зон, сколько их выделено на ранее составленных металлогенических картах. Только на коротких отрезках и только две зоны из ранее выделенных не противоречат положению геохимических аномалий. Достаточно очевидная линейная северо-западная зона может быть ориентирована только по группе аномалий никеля, хрома и кобальта, что легко объясняется связью этих элементов с гипербазитами, трассирующими глубинный разлом. Монополя молибдена позволяют отрисовать зоны различных и равновероятных направлений. Часть аномалий не увязывается в какие-либо зоны (рис. 1).

К арты классов. Выделение классов производится путем автоматической классификации коэффициентов контрастности содержаний элементов [Евдокимова, 1978].

При геологической интерпретации выделяются следующие группы классов: рудные, породные, ландшафтно-геохимические, техногенные. Определяются также классы неясной природы и фоновое поле. К рудным ассоциациям относятся группировки элементов, которые соответствуют тем или иным типам месторождений. Нижний предел контрастности в рудных ассоциациях ≥ 2 и обосновывается точностью аналитических данных. Породные ассоциации выделены на основе геохимической систематики осадочно-метаморфических пород и геохимической типизации гранитоидов, развитых в районе. Выделение ландшафтно-геохимических ассоциаций основывается на классификации геохимических барьеров [Максимова, Ивченко, 1980]. На рассматриваемой площади многочисленны барьерные аномалии цинка.

Интересно, что на карте многомерных полей сохраняется пространственная неупорядоченность рудных ассоциаций. Породные аномалии хорошо согласуются с конфигурацией геологических образований.

Половина классов, распечатываемых на картах многомерных полей, относится к фоновой группе.

Рис. 2. Результаты количественного прогнозирования оруденения по геолого-геофизическим данным [Максимова, Ивченко, 1980].

1—3 — «рудные блоки» различной категории перспективности; 4 — локальные минимумы гравитационного поля.



На карте показаны рудные блоки трех категорий: 1) «наиболее похожие» на рудные эталоны, 2) с пониженной, 3) с наименьшей вероятностью оруденения. Интересно, что в закономерностях расположения рудных блоков традиционные северо-западные металлогенические зоны подтверждаются лишь частично. Авторы усматривают в расположении большинства рудных блоков «кольцевую» структуру (рис. 2).

Отмечается малое сходство геохимических карт, отстроенных на ЭВМ, с тем, что ведущую роль при выделении рудоконтролирующих и рудоносных зон на металлогенических картах сыграли негеохимические данные, хотя последние и использовались с возможной в то время полнотой. Северо-западное направление зон определено геологическими посылками. Принято, что молибденовое оруденение связано с массивами гранитоидов, сгруппированных в серию цепочек северо-западного направления [Батурина, 1970]. Идею «кольцевой» рудоносной структуры предопределили два момента: кольцевое расположение гравитационных минимумов и кольцевые структуры, отдешифрированные на космоснимках [Максимова, Ивченко, 1980]. Картина, представленная геохимическими картами, отстроенными на ЭВМ, не находит пока достаточно полного геологического объяснения, но она наиболее объективно отражает истинное распределение молибденового оруденения в районе.

Карта классов может быть сравнена с другой многомерной картой, построенной по Джидинскому рудному району три года назад З. А. Максимовой и И. П. Ивченко [1980], на которой отражена попытка комплексного анализа всех имеющихся геолого-геофизических материалов. Исследуемая площадь разбита на 356 блоков размером $2,5 \times 2,5 \text{ км}^2$, и для каждого блока на ЭВМ вычислен комплексный геолого-геофизический показатель перспективности.

ЛИТЕРАТУРА

- Батурина Е. Е.** О связи мезозойской металлогенезии Джидинского рудного района с блоковой тектоникой.— В кн.: Рудоносность и структуры рудных месторождений Бурятской АССР. Улан-Удэ, 1970, с. 41—51.
- Евдокимова В. Н.** Автоматизированная система обработки геохимической информации методом многомерных полей.— В кн.: Геохимические поиски месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск: Наука, 1978, с. 3—25.
- Игнатович В. И.** Молибденовые месторождения Западного Забайкалья и особенности их поисков.— Сов. геология, 1980, № 6, с. 34—46.
- Китаев Н. А., Евдокимова В. Н., Чумакин В. Н.** Построение эмпирических моделей зональности рудных тел и их ореолов.— В кн.: Математическая обработка данных поисковой геохимии. Новосибирск: Наука, 1976, с. 115—131.
- Козлов В. Д.** Геохимия и рудоносность гранитоидов внутриконтинентальных редкometальных провинций. Автореф. докт. дис.— Иркутск, 1981.— 45 с.
- Максимова З. А., Ивченко И. П.** Опыт выявления кольцевых рудоносных структур в Западном Забайкалье с применением математических методов.— В кн.: Рудоносность геологических формаций Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1980, с. 113—119.
- Поликарпочкин В. В., Филиппова Л. А., Евдокимова В. Н.** Потоки рассеяния Хапчрангивского рудного района.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск: Наука, 1980, с. 64—73.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ПГО «ЧИТАГЕОЛОГИЯ»

Объемы геохимических работ в ПГО «Читагеология» составляют около 500 тыс. геохимических проб в год, из них около 70% приходится на долю литохимических съемок, около 20% — на опробование скважин и горных выработок, остальные — на опробование потоков рассеяния и сколковое опробование. Материалы литохимических съемок по вторичным ореолам рассеяния анализировались на 15—20 элементов, остальные — на 25—35 элементов.

Традиционные методы обработки геохимической информации, заключавшиеся в определении статистических параметров по ограниченным выборкам, корреляции между отдельными элементами, вынесении аномальных концентраций в виде ореолов на планы опробования по нескольким ведущим (с точки зрения данного специалиста) элементам и составлении каталога аномалий, в значительной мере определили высокий уровень работ.

Наибольшая эффективность геохимических работ несомненно связана с использованием при интерпретации комплексных параметров, но объемы информации не позволяли строить карты по всем элементам и по всем необходимым комплексным параметрам, поэтому большая часть геохимической информации оставалась необработанной. Переход к качественно иным видам работ потребовал максимального использования всей геохимической информации, поэтому принято решение о создании АСОД-Геохимия.

Поскольку основную часть геохимической информации в ПГО составляют материалы литохимической съемки, то первая очередь системы ориентирована прежде всего на переработку материалов площадной литохимии, что определило и основные требования к системе: а) возможность переработки всей геохимической информации ПГО при использовании около 60% машинного времени ЭВМ ЕС-1020; б) использование для ввода в ЭВМ традиционных форм регистрации геохимических данных; в) выдачу результатов обработки в виде, максимально отвечающем конечным целям работ; г) разнообразие методов при снижении стоимости обработки; д) возможность единовременной обработки всех материалов (обычно 20—30 тыс. проб).

СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСОД-ГЕОХИМИЯ

Под автоматизированной системой обработки геохимической информации авторы понимают не только соответствующее программное обеспечение, но и весь комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на решение задач прикладной геохимии, начиная с отбора геохимических проб и кончая рекомендациями. В связи с этим и собственно программное обеспечение системы будет рассматриваться прежде всего в контексте решаемых геохимических задач.

АСОД-Геохимия относится к специализированным системам, предназначенным для решения типовых задач в автоматизированном режиме. Структура системы и методы обработки учитывают специфику получения и интерпретации геохимической информации.

Работа системы обеспечивается взаимодействием следующих подразделений: а) полевой партии (отбор проб, кодирование координат профилей, геологической ситуации, подбор эталонных объектов); б) спектральной лаборатории (спектральный анализ, заполнение бланков анализа, внутри- и межлабораторный контроль); в) вычислительного центра (накопление, корректировка, поиск, формальная постановка задачи и

обработка геохимической информации, выдача результатов в виде карт, таблиц, графиков и др.); г) группы интерпретации (геохимическая постановка задачи, интерпретация результатов обработки на ЭВМ и выводы).

Нормальное функционирование системы во всех технологических режимах возможно при следующем минимальном оснащении ЕС ЭВМ: объем оперативной памяти — 64 Кбайт, накопители на магнитном диске (7,25 Мбайт) — 2 шт., накопители на магнитной ленте — 2 шт., операционная система ДОС 1.3 и выше.

Ограничения на объемы обрабатываемой информации: файл исходных геохимических данных — до 55 тыс. проб, содержащих до 59 элементов. Размер одного рабочего массива данных на магнитном диске — до 8 тыс. проб на 40—60 элементов. Размер рабочего массива при построении геохимических карт — до 55 тыс. проб, в построении могут участвовать одновременно до 50 элементов. Размер регуляризованного выходного массива может быть до 33 тыс. точек (около 8 листов масштаба 1 : 50 000).

В системе использованы элементы стандартного математического обеспечения для ЕС ЭВМ, разработанного Институтом математики АН БССР. Языки программирования — Ассемблер, Фортран-4, ПЛ-1.

Информационная база АСОД-Геохимия имеет файловую организацию, ее логическая структура представлена следующими их типами (каждый из которых может иметь модификации): 1) файл исходных геохимических данных; 2) файл промежуточных результатов обработки; 3) файл статистических характеристик рабочих массивов; 4) файл характеристик классов; 5) файл регуляризованных геохимических данных; 6) файл контрольных точек; 7) рабочие файлы.

Программное обеспечение системы по типу решаемых задач состоит из нескольких информационно связанных комплексов программ — подготовки данных к автоматизированной обработке, управления данными, описания геохимических объектов, сравнения и разграничения геохимических объектов, построения геохимических карт, классификации геохимических полей и объектов, специальных задач.

Комплекс подготовки геохимических данных позволяет производить подготовку данных на перфокартах, перфолентах и магнитных лентах с последующим преобразованием в файл геохимических данных на магнитной ленте. Осуществляет формальный и логический контроль данных (проверяются синтаксис записи, допустимые содержания по табличным значениям, по минимальным и максимальным значениям элементов, по граничным координатам участка).

Перфорация производится в свободном формате с традиционных бланков спектрального анализа, дополненных слева колонками «геологический код», «координата X», «координата Y», или, при профильной системе опробования, с журнала опробования. В последнем случае вместо координат используются номера профилей и пикетов. Направление осей X и Y может быть произвольным. Все реквизиты пробы — название экспедиции, партии, геологический код и номер пробы — не должны содержать нецифровых символов.

Комплекс управления данными — сортировка и слияние (горизонтальное и вертикальное) массивов, корректировка записей массивов, формирование рабочих массивов (по сочетанию геологических кодов, координатам, значениям элементов, номерам проб и по другим реквизитам). Задание на формирование рабочих массивов представляет собой логический оператор достаточно сложной структуры, но с относительно простым синтаксисом. При определении условий формирования выборки используются логические операции И, ИЛИ, НЕ, а также операции отношения РАВНО, БОЛЬШЕ, МЕНЬШЕ. Сформированный рабочий массив может быть выведен на магнитный диск или магнитную ленту. Корректировка записей может выполняться как непосредственно в процессе формирования исходного файла, так и в любое другое время.

Комплекс описания геохимических объектов — построение гистограмм (по расчетным или заданным интервалам); расчет статистических

характеристик (параметрические и непараметрические методы); расчет парных и множественных коэффициентов корреляции, корреляционного отношения; построение дендрограмм ассоциаций, факторный анализ (R -и Q -типа), расчет уравнений регрессии (пошаговая множественная, парная, полиномиальная).

К этому же программному комплексу относятся:

программы выделения аномалий, позволяющие определить на основе статистических эталонов градации аномальных содержаний элементов и все пробы в целом (с определением процентного соотношения аномальных значений в массиве), а также программы расчета значений факторов, мультипликативных и аддитивных показателей и их отношений, расчетных, по уравнениям регрессии, содержаний элементов и т. п.;

комплекс сравнения и разграничения геохимических объектов; одномерное и многомерное сравнение, разграничение линейно-упорядоченного пространства по методу Д. А. Родионова, графические методы (на ортогональной диаграмме по расстоянию или на треугольной по подобию);

комплекс построения геохимических карт — сглаживание по методу скользящего окна и печать карт, построение трендов. Геохимические карты и карты трендов могут быть построены в любом масштабе по следующим параметрам: изоконцентраты, изоаномалии, коэффициенты концентраций, экстенсивность аномальных проб в единице площади, аддитивные и мультипликативные показатели и их отношения; значения факторов и других параметров.

Геохимические параметры в окнах в процессе осреднения учитываются с весом, обратно пропорциональным квадрату расстояния пробы от центра окна. Комплексные параметры рассчитываются на основании осредненных значений содержаний элементов. Максимальное количество одновременно рассчитываемых параметров — 126. Существует возможность автономного расчета комплексных параметров без повторного осреднения. В процессе печати полей изолиний на АЦПУ производится линейная интерполяция значений функции в межузловом пространстве карты, последовательные поля заполняются чередующимися по контрастности символами. «Пустые» (без пунктов опробования) участки карты, превышающие по площади размеры сглаживающего окна, при печати изображения остаются незаполненными.

Отпечатанные на АЦПУ последовательные полосы карты полностью совместимы по координатам и рисунку изолиний.

Комплекс классификации геохимических полей и объектов: автоматическая классификация геохимического поля (меры сходства — функция от косинуса угла между векторами в многомерном пространстве, соответствующими объектам, или евклидово расстояние, критерий группирования — ближайшее среднее, или парагрупповой метод). Объектами автоматической классификации являются факторные значения геохимического поля в узлах равномерной сети или исходные признаки, нормированные и ненормированные. Процедура АК состоит из предварительной оценки делимости совокупности, классификации методом альфа-бета процедуры (с «плавающими» центрами классов и изменяющимися значениями среднего радиуса) и оптимизации полученных результатов. Предварительная оценка делимости осуществляется построением иерархической дендрограммы расстояний между объектами парагрупповым методом по небольшому (до 100) числу объектов. При классификации методом альфа-бета процедуры классифицируемый объект относится к одному из ранее выделенных классов или образует новый класс. Конечное число классов не определено, но не более 100. Результаты классификации оформляются в виде карты классов, дендрограммы расстояний между векторами средних классов и таблиц характеристик классов (в исходных значениях и нормированных). По дендрограмме может быть осуществлено объединение классов и пересчитаны их характеристики. При наличии эталонных объектов могут быть произведены целевая классификация различными методами и смешанный вариант классификации. В случае

геохимических объектов — не узлов регулярной сети — вместо карты классов выдается список принадлежности объектов классам.

Комплекс решения специальных задач — расчет ряда зональности по методике С. В. Григоряна, автокорреляции и гармонический анализ, анализ пространственных закономерностей расположения геохимических классов, а также различные сервисные программы (например, перестановки координат X и Y , масштабирование и поворот координат, перестановки геохимических элементов и др.) и программа расчета погрешностей спектрального анализа и ошибок отбора проб.

* * *

Промышленная эксплуатация системы показала эффективность ее применения при решении производственных задач ПГО и в то же время определила ее недостатки и проблемы. За четыре года эксплуатации обработано и накоплено в долговременном фонде системы около 2 млн. геохимических проб, большая часть которых относится к данным площадного опробования. Проводилась опытная переинтерпретация архивных данных на основе использования математических методов и ЭВМ, показавшая высокую эффективность подобных работ. За прошедшее время заметно повысилась культура использования геохимической информации, система положительно повлияла на всю организацию геохимических работ, начиная с планирования пробоотбора и кончая кругом решаемых прогнозных задач и способами представления конечной информации.

Наиболее полная и качественная геологическая информация получается при комплексной интерпретации всех геохимических карт. Анализ построенных на ЭВМ геохимических карт масштаба 1 : 50 000 показывает, что все известные месторождения и рудопроявления четко отмечаются комплексными геохимическими аномалиями.

Основным достоинством АСОД-Геохимия по сравнению с ручной обработкой является не только экономия времени специалистов от неприводительной работы по разноске исходных данных и отрисовке ореолов, но и получение качественно новой полезной информации за счет использования всего перечня анализируемых элементов и применения программ и алгоритмов, основанных на работе сложного математического аппарата. Так, например, впервые получена возможность в массовом порядке устанавливать зональность месторождений, рудопроявлений и аномалий (в проекции на горизонтальную плоскость) по данным площадного опробования на основе определения ведущих факторов и вычисления факторных нагрузок.

Наиболее существенными, с точки зрения авторов, недостатками системы являются: а) относительно высокая стоимость и нетехнологичность системы при решении задач с многочисленными, но малыми (менее 1000 проб) выборками; б) ограниченная возможность использования информации о геологическом строении исследуемой территории; в) ограниченность методов обработки данных опробования горных выработок и количественной оценки выявленных аномалий.

Массовая обработка геохимической информации во всей полноте поставила вопрос о площадных геохимических эталонах. Несмотря на значительную изученность большинства месторождений и многих рудопроявлений, данные о распределении геохимических элементов на площади рудных полей месторождений, как правило, отсутствуют или не соответствуют масштабам проводимых поисковых работ. Не сформулировано понятие геохимического эталона, отсутствует геохимическая классификация рудных месторождений. В настоящее время в ПГО «Читагеология» ведутся работы по созданию фонда геохимических эталонов.

Дальнейшее развитие системы будет определять такие основные направления: повышение степени автоматизации и технологичности системы с сохранением гибкости в подходе к решению конкретных геохими-

ческих задач; модернизация информационной базы и создание соответствующего программного обеспечения, с тем чтобы получить возможность использования знаний о геологическом строении территории; включение современных алгоритмов и программ для более полной обработки геохимических данных по первичным ореолам рассеяния и количественной оценки геохимических аномалий; практическое решение проблемы геохимических эталонов.

Д. А. РОДИОНОВ, Т. Ю. СПИВАК

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ И РАНЖИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Одной из основных задач геохимических поисков является выделение аномалий из исследуемого набора геологических объектов. Иногда эта задача решается по одному признаку, но чаще всего геологические объекты представлены наборами наблюдений над комплексом признаков, и при выделении аномалий необходимо использовать весь комплекс, поскольку тогда решение по отдельно взятому признаку приводит к противоречивым результатам. Следует отметить, что при выделении аномалий по комплексу признаков существует два направления. Первое из них предполагает наличие заранее заданных групп объектов с определенными свойствами. Классификационное отнесение изучаемых объектов к одной из этих групп осуществляется либо с помощью чисто эвристических процедур, называемых распознаванием образов, либо методами дискриминантного анализа.

Другое направление связано с ситуациями, когда априори отсутствуют сведения об объектах, служащих эталонами для принятия классификационных решений. Отметим, что этот случай является наиболее характерным в геологической практике, поэтому именно он рассматривается в статье.

В такой ситуации в первую очередь возникает задача проверки гипотезы об однородности исследуемого набора объектов, и лишь тогда, когда эта гипотеза отклонена, непосредственно выделяется аномалия. При этом традиционно интуитивно однородность понимается как идентичность средних значений комплекса признаков по всем объектам рассматриваемого набора.

Формально такая задача сводится к следующему. В качестве модели геологического объекта, представленного последовательностью наблюдений над комплексом признаков, рассматривается многомерная случайная величина $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m\}$, имеющая известное распределение с определенными параметрами Θ . Тогда утверждение, что все геологические объекты рассматриваемого набора равнозначны, равносильно статистической гипотезе о равенстве значений параметров:

$$H_0: \Theta_1 = \Theta_2 = \dots = \Theta_k = \Theta_0,$$

учитывающих множества $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$ независимых случайных величин $\xi_p = \{\xi_{p1}, \xi_{p2}, \dots, \xi_{pm}\}$. Эта гипотеза рассматривается как нулевая. Альтернатива, заключающаяся в том, что набор распределений неравнозначен, задается неравенством $H_1: \Theta_p \neq \Theta_0$ хотя бы для одного номера p ($p = \overline{1, k}$).

В принципе в качестве параметров Θ можно принять m -мерные векторы средних значений $\Theta_p = \mu_p$ или же ковариационные матрицы $\Theta_p = \Sigma_p$, а можно векторы средних и ковариационные матрицы $\Theta_p = (\mu_p, \Sigma_p)$. Мы остановимся на первом варианте, а именно однородность будет пониматься как равенство многомерных средних, т. е. задаваться в виде

нулевой гипотезы:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu_0,$$

тогда как альтернатива будет представлять собой неравенство $H_1: \mu_p \neq \mu_0$ хотя бы для одного номера $p(p = \overline{1, k})$.

Проверка нулевой гипотезы осуществляется на основании эмпирических данных, которые в нашем случае представляют собой набор из k прямоугольных матриц (выборок) порядка $n_p \times m$, где n_p — число наблюдений в выборке с номером p , m — число анализируемых признаков. Для самой проверки сформулированной гипотезы однородности в теории статистики существуют различные критерии, конкретное применение которых определяется дополнительными ограничениями, вводимыми в условие задачи. Предположим, что распределение каждой выборочной совокупности согласуется с нормальным. Приятие нормального закона в качестве модели распределения многомерной случайной величины, имитирующей в наших построениях реальные исследования, вполне оправдано. Еще А. Б. Вистелиусом установлена непротиворечивость этого закона для распределений выборочных значений, соответствующих «локальным участкам». В дальнейшем многие авторы придерживались в своих исследованиях этой гипотезы. Нормальный закон, являясь предельным для различного рода распределений, наиболее широко применим во многих задачах прикладной статистики.

Естественно, при изучении множества локальных участков, т. е. рассматривая весь набор геологических объектов, мы имеем некоторое распределение, представляющее собой взвешенную смесь различных нормальных распределений. В рамках принятой модели для проверки сформулированной гипотезы однородности целесообразно привлечь известный параметрический критерий Джеймса [Кульбак, 1967]. Преимущество этого критерия заключается в том, что он не предполагает равенство ковариационных матриц, т. е. выполнения того условия, которое не всегда имеет место в действительности. Определенные трудности в использовании этой статистики связаны с необходимостью процедур нахождения значений обратной матрицы при ее расчете, так как не исключена возможность получения по отдельным выборкам плохо обусловленных матриц, обращение которых некорректно. Во избежание этой возможности накладывается требование: для любого объекта исследования число наблюдений должно превышать число анализируемых признаков, т. е. $n_p > m$. Обойти это требование можно, если рассматривать статистически независимые признаки. Конечно, данное допущение является нестрогим, но для локальных участков оно вполне допустимо. Для таких признаков ковариационная матрица диагональна, и поэтому процедура обращения не вызывает трудностей.

В последнее время все более широкое применение в практике приобретают ранговые процедуры как асимптотические методы проверки гипотез о равенстве. объясняется это тем, что ранговые статистики, представляющие собой определенные комбинации рангов и (или) меток, довольно просты; их применение возможно без априорных сведений о типе распределения рассматриваемых совокупностей, при этом в значительной степени уменьшается влияние отдельных «ураганных» проб. Правда, мощность ранговых критериев меньше мощности соответствующих, и на слишком малом признаком уровне значимости потери в мощности незначительны. С нашей точки зрения, решения, получаемые с помощью параметрических критериев, должны контролироваться решениями, получающимися ранговыми тестами, и именно разумное комплексирование параметрических и ранговых процедур позволит получить стабильные результаты.

Упомянутому выше критерию Джеймса в классе ранговых процедур соответствует критерий Пури — Сена — Тамуры. Статистика этого теста рассчитывается либо на основании рангов (аналог одномерного критерия Вилкоксона), либо на основании нормальных меток (аналог одномерного

критерия Ван-дер-Вардена). Выбор того или иного варианта определяется общим количеством наблюдений по всему набору геологических объектов. Если это число значительно больше, то целесообразно использование статистики во втором варианте. Здесь независимо от того, как сильно изменяются исходные наблюдения по отдельным выборам, их метки, т. е. величины, по которым производится расчет статистики, принадлежат интервалу (-3,3).

В результате применения любого из вышеназванных критериев гипотеза о равнотенности k объектов либо принимается, либо отклоняется. Если гипотеза принимается, то этот результат окончен и весь набор рассматривается как не содержащий аномалий. Если же гипотеза H_0 отклонена, то возникает новая задача выделения среди набора неоднородных объектов групп равнотенных объектов. К решению этой задачи можно подойти различным образом. Разграничение может производиться с помощью иерархической агломеративной процедуры попарных сравнений, достаточно трудоемкой в вычислительном плане, но отличающейся однозначностью. Непосредственно сам алгоритм последовательной кластеризации описан в литературе (например, [Родионов, 1981]). Другое решение связано с поэтапной проверкой гипотезы однородности с последующим удалением в случае ее отклонения из рассматриваемого набора наиболее отличающегося (в смысле выбранной метрики) множества многомерных наблюдений. Определенная некорректность в применении этой процедуры для разграничения исходного набора совокупностей связана с рядом причин. Во-первых, наличие в рассматриваемом наборе неконтрастных выборок приводит к возрастанию допустимого значения в то время, когда расчетное значение статистики возрастает незначительно, что вызывает принятие нулевой гипотезы в условиях альтернативы. С другой стороны, границы получаемых однородных классов будут размыты, т. е. возможно попадание статистически однородных между собой объектов в разнородные классы. Однако данные отрицательные моменты компенсируются большим быстродействием рассмотренной процедуры.

В конечном итоге в результате применения той или иной процедуры весь набор геологических объектов разграничится на h не пересекающихся, различающихся в среднем по комплексу признаков однородных, в определенном смысле, классов объектов, насчитывающих соответственно k_1, k_2, \dots, k_h членов, где $\sum_{p=1}^h k_p = k$. Причем каждый такой p -й класс характеризуется многомерным параметром, представляющим некоторую комбинацию статистических оценок параметров однородных совокупностей, составляющих этот класс. В качестве фонового выбирается тот класс, который объединяет наибольшее число элементов, остальные принимаются как аномальные. Число таких аномалий может оказаться значительным, и, естественно, возникает задача упорядочения этих аномалий.

Для решения поставленной задачи для каждого однородного класса вводится скалярная величина, представляющая собой разницу квадрата расстояния этого класса от начала координат и квадрата расстояния фонового класса от начала координат. Эта величина может принимать как положительные, так и отрицательные значения в соответствии с отклонением параметров аномальной совокупности от фоновой в ту или иную сторону. Она может рассматриваться в качестве обобщенной одномерной характеристики выделенного однородного класса, в зависимости от значений которой можно выделить как положительные, так и отрицательные аномалии и упорядочить их по степени предпочтительности.

Для решения приведенных задач создан комплекс программ для ЭВМ ЕС.

Рассмотренный подход к решению задачи выделения аномалий апробировался на данных прямых геохимических поисков на территории Туркмении. С помощью рассмотренного метода обработаны результаты анализов по площадям Эсембай, Ханкир., Район исследования охватывал

моноклинальный склон Бадхизской зоны поднятий. Вскрытый геохимическими скважинами (500 м) разрез не имеет резких литологических различий. Это однообразная песчано-алевролитовая континентальная толща, характеризующаяся высокими показателями пористости и проницаемости для всего региона и имеющая большую влажность. Итоговыми документами явились карты в изолиниях, отражающие характер изменения показателей газонасыщенности по изучаемым площадям.

ЛИТЕРАТУРА

- Кульбак С. Теория информации и статистика.— М.: Наука, 1967.— 408 с.
Родионов Д. А. Обобщенная постановка задачи о выявлении и проверке геохимических аномалий.— В кн.: Статистические методы геологических исследований. Вып. 4. М.: изд. ИМГРЭ, 1971, с. 3—9.
Родионов Д. А. Статистический метод выявления геохимических аномалий.— В кн.: Методы и результаты математико-статистических исследований в геологоразведочном деле. М.: Наука, 1972, с. 3—7.
Родионов Д. А. Статистические решения в геологии.— М.: Недра, 1981.— 231 с.

Г. Л. РУБО, Л. Н. ГИНЗБУРГ, С. И. АШКИНАЗЕ

СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ЭВМ ЕС

В последние годы все более отчетливо проявляется тенденция к резкому увеличению объемов геохимической информации, поступающей к исследователю и требующей всестороннего анализа. Подобное явление вызвано прежде всего развитием и совершенствованием методики проведения геохимических работ, расширением на этой основе круга решаемых задач с привлечением более широкого спектра элементов-индикаторов в процедуру обработки, совершенствованием самих методов анализа вещества и резким увеличением масштабов применения экспрессных геохимических работ. Все вышесказанное привело к образованию «лавинообразного» потока информации, качественная и тем более количественная обработка которого становится совершенно немыслимой без привлечения современных быстродействующих ЭВМ.

Ниже дается описание логической схемы взаимодействия ряда специализированных программ, объединенных в систему, позволяющую проводить надежную всестороннюю обработку исходной геохимической информации на различных стадиях работ.

Программы разработаны в ИМГРЭ и входят как составная часть в общую автоматическую систему обработки геохимической информации на базе ЭВМ ЕС.

Вне зависимости от масштаба проведения геохимических работ объектом исследования является аномальное геохимическое поле, в пределах которого зафиксированы систематические отклонения от фона значений изучаемых признаков.

Процесс анализа АГП, охарактеризованного N признаками, желательно свести к получению некоторого количества (значительно меньшего, чем N) синтезированных характеристических показателей, функционально связанных со степенью неоднородности (анизотропии) АГП. Полученные показатели позволят судить об особенностях строения и составе различных частей АГП.

При крупномасштабных геологоразведочных работах, проводимых в пределах действующих горнорудных предприятий, а также при оценке выявленных ранее полей вся получаемая геохимическая информация может быть разбита на два самостоятельных массива данных — эталонный и рабочий.

Эталонный массив составляют геохимические данные, собранные при детальном изучении хорошо разведанных и вскрытых горными выработками месторождений или других геологических объектов. Эталонный массив должен выявлять существующую геохимическую неоднородность и отражать все своеобразие изучаемых объектов. Под геохимической неоднородностью понимается существование пространственной дифференциации типоморфных комплексов элементов, слагающих АГП.

Все геохимические данные, составляющие эталонный массив информации, могут быть разбиты на M подмассивов (классов), характеризующих пространственно разобщенные участки АГП, различающиеся по гипсометрии, геологическому строению и т. д. Выбор классов должен следовать из целей поставленных задач и специфики изучаемых геологических объектов. Правомочность выделения M классов в эталонном массиве данных может быть проверена при помощи одного из режимов программы «Класс» (автор Л. Н. Гинзбург). Этот режим программы реализует известные критерии Готтелинга и Кульбака [Андерсон, 1963; Кульбак, 1967] для сравнения ковариационных матриц и векторов математических ожиданий выделенных классов. При отсутствии различий между какими-либо классами программа объединяет их в один более крупный класс. Затем каждый из M классов изучается с помощью R -метода факторного анализа (программа «Фактор», автор Л. Н. Гинзбург), который вскрывает структуру данных, составляющих эти классы, и может помочь при выборе комплекса типоморфных ассоциаций элементов.

Следующим этапом в процедуре обработки геохимической информации является определение пороговых (фон, аномалия) значений признаков во всех разновидностях выделяемых на объекте пород. Для этой цели по специально сформированному «фоновому» классу с использованием программы «Порог» (автор Л. А. Верховская), реализующей алгоритм, основанный на применении одного из непараметрических методов оценки плотности распределения признака, определяются среднефоновые значения признаков во всех породах. К последующему анализу привлекаются только те признаки (элементы), для которых установлены в контурах АГП аномальные значения концентраций. Эти параметры передаются в программу «Карта» (автор С. И. Ашкиназе) для построения на АЦПУ или графопостроителе моноэлементных карт.

Следующая задача — выявление степени различий выделенных M классов по каждому признаку. Подобная процедура реализована в виде программы «Мэн» (автор Л. Н. Гинзбург), алгоритм которой построен на непараметрическом критерии Манна — Уитни. В результате работы программы для каждого из сравниваемых признаков в двух классах вычисляется критерий различия t_j . Рассчитав средние значения \bar{t}_j для каждого признака при сопоставлении классов и сравнив эти величины с t_q , где t_q — критическое значение при уровне значимости q , признаки ранжируют по возрастанию \bar{t}_j . Таким образом, получаем ряд степени различия классов по признакам. Весь дальнейший анализ осуществляется лишь с теми элементами, для которых установлено $t_j > t_q$. Обозначим число их L , названия признаков — L_j . Теперь каждая проба АГП может быть описана L признаками, причем $L \leq N$. Следующим шагом является выделение из L признаков наиболее информативной их комбинации, состоящей из K признаков, причем $K \leq L$. Для реализации этой задачи служит программа «Эффект» (автор Л. Н. Гинзбург), алгоритм которой, основанный на методе случайного поиска с адаптацией, предложен Г. С. Лбовым [1970].

Следующим этапом обработки исходной геохимической информации является построение рядов пространственной дифференциации элементов (рядов зональности), что реализовано в программе «Ряд» (автор С. А. Сандомирский). Для этой цели из программы «Мэн» в программу «Ряд» передаются все элементы L_j , и для них из программы «Порог» заимствуются величины фоновых концентраций для всех разновидностей пород участка

работ. Проанализировав экстремально расположенные в полученным ряду элементы и сопоставив их с рядами элементов, выдаваемыми программами «Мэн» и «Эффект», можно выбрать некоторый «неформальный» набор элементов. Из этого «неформального» ряда элементов — сформировать оценочный коэффициент КЗ, значения которого рассчитываются в каждой точке эталонного массива (программа «Мульт», автор С. А. Сандомирский). На основании полученных значений КЗ программой «Карта» строится его топографическая поверхность, отражающая степень неоднородности АГП. Одновременно могут быть построены карты развития комплекса элементов фронтальных (числитель КЗ) и тыловых (знаменатель КЗ) частей зональной колонны.

Между интегральным полем, образованным элементами числителя КЗ, и аналогичным полем элементов знаменателя далее определяются тип и теснота пространственных связей полей, что осуществляется программой «Вектор» (автор С. И. Ашкназе). На основе полученных значений строится карта, отражающая неоднородность этих связей на различных гипсометрических уровнях сечения АГП, а также по мере удаления от основной структуры. Чем выше степень неоднородности элементов «тыл — фронт», тем ближе к (-1) приближается значение поля в данной точке пространства, $(+1)$ отражает зоны рассеянной минерализации, и, наконец, (0) — фоновые области.

На заключительном этапе обработки эталонного массива все выделенные M классов рассматриваются как «обучающие». Программа «Класс» проводит процедуру обучения, рассчитывает дискриминанты, линейные и нелинейные решающие функции и выбирает из них оптимальные в смысле распознания. Найденные решающие правила, дающие возможность с минимальной ошибкой различать M классов, принимаются за основу для дальнейшего использования их при обработке информации по рабочему массиву. Каждой пробе рабочего массива придается индекс $(1, 2, \dots, M)$ в соответствии с тем, к какому классу отнесла их программа. В случае отказа от решения выделяется новый «неизвестный» класс.

На рабочем массиве осуществляются расчет в каждой точке значений КЗ, построение карт по полученным данным, а также элементов «фронт — тыл», построение карты векторных связей интегральных элементов фронтальных (числителя) и тыловых (знаменателя) частей рядов зональности. В заключение обработки рабочего массива строится карта выделенных в нем классов. Сопоставление эталонных и рабочих результатов обработки служит основой для принятия решения о перспективных участках, охарактеризованного рабочим массивом.

Обработка геохимической информации, собираемой в процессе средне- и крупномасштабного геохимического прогнозирования, предусматривает на основе определения фоновых и аномальных концентраций элементов-индикаторов (программа «Порог») построение моноэлементных карт. Далее локализация перспективных площадей осуществляется путем оконтуривания общего аномального геохимического поля (программа «Мульт», работающая с элементами-индикаторами, имеющими аномальные значения в пределах изучаемой территории).

В пределах общего АГП с привлечением факторного анализа определяются наиболее типичные ассоциации элементов-индикаторов (программа «Фактор»). Далее строятся карты частного АГП, т. е. ориентированные только на типоморфный комплекс элементов, характеризующий ту или иную рудную формацию. При помощи программы «Контур» (автор С. И. Ашкназе) из областей, ограниченных частными АГП, выбираются все точки и для полученного массива вычисляется ряд характеристических параметров — среднеаномальные значения признаков, коэффициенты концентрации элементов, коэффициенты аномальности, среднее значение коэффициента зональности и т. п.

Сопоставление выделенных аномалий осуществляется при помощи программ «Q-фактор» и «Кластер» (автор Л. Н. Гинзбург). Геохимический, геологический облик района проявления аномалий и вид построенных

дендrogramм и графиков служат основой для геохимической оценки выделенных аномалий одного формационного типа.

Сведение полученных вышеописанным способом данных на одну геологическую основу для всех возможных проявлений здесь формационных типов представляет собой общую прогнозно-геохимическую карту, построенную по результатам опробования на широкий спектр элементов изучаемой территории (листа карты).

ЛИТЕРАТУРА

- Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ.— М.: Физматгиз, 1963.— 650 с.
Кульбак С. Теория информации и статистика.— М.: Наука, 1967.— 408 с.
Лбов Г. С. Случайный поиск с адаптацией.— В кн.: Геология и математика. Новосибирск: Наука, 1970, с. 204—220.

Э. Н. ПОЗДНЯКОВ

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ (АСОД ГИПИ)

Комплекс программ ГЕОНАВТ, функционирующий на базе ЭВМ ЕС-1020 под управлением операционной системы ДОС, предназначен для ввода, накопления, хранения, поиска и передачи обрабатывающим программам первичных данных, прежде всего данных геохимического опробования исследуемых геологических объектов. Большое внимание уделено диагностике ошибок подготовки данных на машинных носителях (перфокартах, перфолентах, магнитных лентах) и приемам их оперативного исправления.

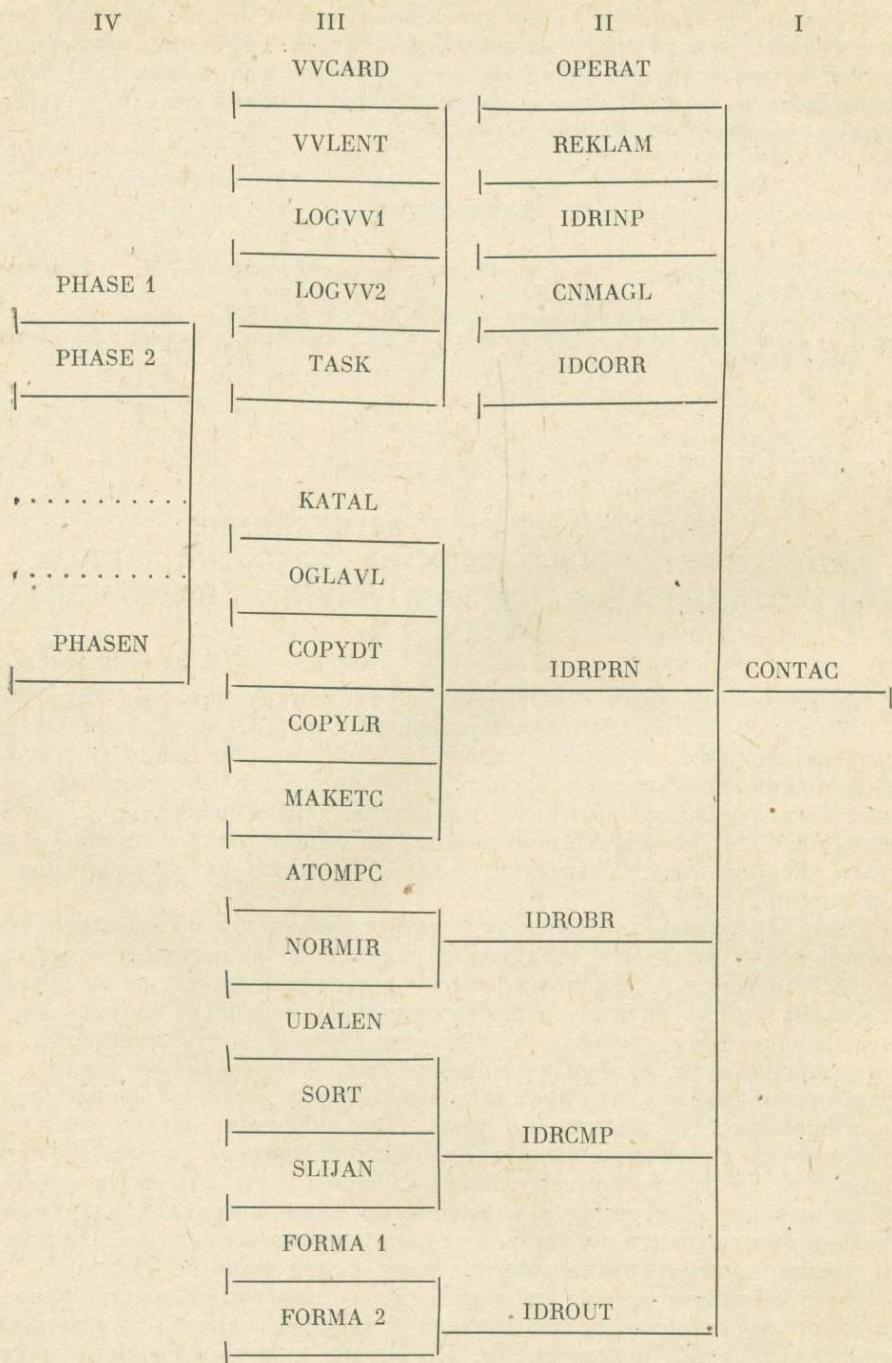
Внешний уровень организации данных сводится к построению строк, которые могут включать следующие реквизиты: наименование выборки данных, имя владельца данных, список имен признаков, список чувствительностей метода анализа вещественного (элементного) состава пробы, список масштабных множителей, описание структуры строки данных, имя точки опробования, интервалы опробования, весовые коэффициенты, индексы пробы (аномалии), текстовые примечания, количественные значения признаков. На логическом уровне организации данных реквизиты формируются в структуризованные записи. Структура записи переменна и описывается специальным шаблоном. Этот прием позволяет избежать переписывания на стандартные машинные бланки исходного документа пользователя-геолога и отказаться от кодирования реквизитов. На машинном уровне данные организованы в виде файла прямого доступа.

На логическом уровне пользователя данные могут рассматриваться как набор поименованных совокупностей записей (макетов), имеющих некоторый смысл для пользователя. На основе хранимого набора макетов пользователь может формировать новые макеты, имеющие статус исходных.

ГЕОНАВТ имеет средства передачи данных внешним программам. Он рассчитан на массовое применение (5200 пользователей, 60 млн. проб) и управляется диалоговыми средствами, которые не требуют знания ЭВМ или программирования. Данные защищаются от несанкционированного использования.

Без дополнительных затрат ГЕОНАВТ обеспечивает данными программы петрохимических пересчетов и автоматизированной диагностики минералов.

Архитектура программного обеспечения системы ГЕОНАВТ



Примечание. I — корневая фаза **CONTAC**, идентифицирующая системные действия; II — фазы, идентифицирующие режимы выполнения системных действий; III — фазы, реализующие системные процедуры; IV — возможный вариант развития программного обеспечения.

При создании ГЕОНАВТа к нему предъявлялись следующие требования: гибкая восприимчивость к изменениям; простота диалогового управления системой; свобода выбора комбинаций признаков для анализа; возможность ввода данных, подготовленных на различные устройства по различным шаблонам без кодирования и переписывания на бланки; удобства в исправлении ошибочных данных; возможность постепенного их на-

копления, коррекции и удаления других (устаревших или искаженных); возможность быстрого поиска, предварительной обработки и перекомпоновки первичных данных; ориентация на массовое использование геологами и геохимиками с максимальной разгрузкой пользователя от рутинных операций.

Обеспечение гибкой восприимчивости к изменениям и развитию ГЕОНАВТа реализовано в архитектуре программного обеспечения (см. схему). Оно представляет собой единую оверлейную структуру с диалоговым управлением отдельными программными фазами. Вся совокупность программных фаз разделена на семь групп по функциональному признаку. Функциональные группы программы реализуют так называемые системные действия: 1) управление магнитными лентами; 2) ввод; 3) печать; 4) корректировка; 5) компоновка; 6) обработка; 7) вывод. Выбор действия производится внутри корневой фазы, на схеме имеющейся СОНТАС, выбор программной фазы или ее модификация внутри функциональной группы производится блоками идентификации режимов (на схеме блоки с именами IDRINP, CNMAGL, IDRPRN, IDCORR, IDROBR, IDRCMP, IDRROUT).

Выбор и реализация режима действия обычно связаны с загрузкой в оперативную память ЭВМ новой программы, хотя иногда такая загрузка и не производится.

Все изменения в системе программного обеспечения теперь могут быть сведены к изменению одной из фаз, идентифицирующих режим действия (при включении нового режима в рамках старого системного действия), или же к изменению корневой фазы (при включении в программное обеспечение новых системных действий). В смысле развития программного обеспечения ГЕОНАВТ, таким образом, является открытой системой.

Диалоговое управление выполнением действий с одинаковой легкостью доступно как оператору системы, так и геологу-пользователю. Оно базируется на подмножестве общепринятых слов русского языка. Пример вызова программы ввода данных с перфоленты приведен ниже, причем запросы ГЕОНАВТа помечены знаком *:

* СИСТЕМНОЕ ДЕЙСТВИЕ?
ФИЗИЧЕСКИЙ ВВОД
* РЕЖИМ ВВОДА?
ПЕРФОЛЕНТА

Вызов любой другой программы столь же прост.

Свобода выбора группы признаков со стороны исследователя обеспечивается специальным языком описания данных (ЯОД). ЯОД допускает использование для признаков произвольных имен, имеющих формальную структуру машинных слов, построенных на базе алфавита системы. В алфавит включены все символы международного телеграфного кода № 2 (МТК-2) и коды ЕС ЭВМ. Отдельные символы алфавита выполняют служебные функции забоя знака, разделения машинных слов, выделения логической записи, ограничения физической записи на перфоленте (в порядке перечисления это символы, «?», «:», «(« и »)», «/»). Набор машинных слов различного типа позволяет вводить в ЭВМ следующие неформальные реквизиты:

- 1) имя геологического объекта;
- 2) имя владельца данных;
- 3) имя точки опробования;
- 4) список имен признаков;
- 5) список чувствительностей метода измерения признака;
- 6) вектор числовых данных, характеризующих точку опробования;
- 7) наименование горной породы в точке опробования;
- 8) три пространственных координаты точки опробования;
- 9) весовой коэффициент;
- 10) текстовое примечание произвольной структуры;

- 11) индекс-идентификатор геохимической аномалии;
- 12) левый и правый интервалы опробования на линейных горных выработках;
- 13) порядковый номер пробы в некоторой логической последовательности (возможно, разработанной геологом-пользователем).

Машинные слова объединяются в структурно фиксированные логические записи. Различаются логические записи, образующие заголовок (шапку) числовой выборки, и логические записи, представляющие саму выборку. В логической записи последнего типа обязательно присутствие имени точки опробования, наличие же и последовательность расположения прочих реквизитов произвольно. Однозначность расшифровки таких записей обеспечивает специальная запись-шаблон, несущая информацию об их фактической структуре. Количество записей в выборке переменно, и ее граница отмечается логической записью КОНЕЦ. Оформленная таким образом выборка пользователя называется информационным макетом и служит основной единицей ввода информации в ЭВМ.

Машинное слово для представления количественных данных имеет сложную структуру и служит для их кодирования и в особых случаях. В таблице приведены правила преобразования слов-данных к машинному виду.

Применение слова-данного достаточно сложной структуры и возможность описания в шаблоне структуры логической записи в соответствии со строением первичного документа геолога-пользователя полностью устраняет необходимость его переписывания на стандартный бланк. Дело сводится к объяснению структуры документа оператору подготовки данных.

Использование символа забоя и символов выделения логической записи дает оператору подготовки данных мощные средства оперативного исправления замечаемых в ходе подготовки данных ошибок. Выбранная структура входных данных позволяет диагностировать около ста ошибочных ситуаций. Ошибки различаются по степени грубости. Если имеется риск потери большой порции информации из-за ошибок в шапке макета, программы ГЕОНАВТ обращаются с запросом на их исправление прямо за пультом ЭВМ, и пользователю или оператору системы необходимо принять решение об их исправлении или игнорировании вводимого макета. В связи с этим обстоятельством ГЕОНАВТ может рассматриваться как интерактивная система. Если ошибка касается единственной записи из числовой выборки, то в память ЭВМ она не вводится, место для нее не

Особые случаи представления данных

Символ	Значение	Операция с числовым частью данных
ББ	Значительно больше	Числовая часть умножается на коэффициент 1.500
Б	Больше	—
БР	Больше — равно	—
МР	Меньше — равно	—
М	Меньше	—
ММ	Значительно меньше	—
ПР или ПЦ	Процент	Учитывается размерность данных
ПМ или РМ	Промилле	—
ППМ или РРМ	Пропромилле	—
—	Прочерк	В машинный массив записывается нуль
СЛЕД или СЛ		— — — — — половина чувствительности

П р и м е ч а н и е. Если пользователя не устраивает принятие в системе ГЕОНАВТ преобразование особых данных, он обязан устраниить их из первичного документа, поступающего на перфорацию.

резервируется, а указываются только тип и место ошибки. После исправления оператором подготовки данных группа таких записей может быть вновь введена, проконтролирована и в случае правильности записана в долговременную память.

Широта входного алфавита ГЕОНАВТа позволяет осуществлять подготовку данных как на карточных перфораторах и устройствах записи на магнитную ленту, входящих в комплект оборудования ЭВМ, так и на телеграфных аппаратах типа Т63. Только для последних реализована возможность передачи данных по существующим каналам абонентской телеграфной связи, и ГЕОНАВТ, ориентированный на работу с удаленными пользователями, принимает телеграфную перфоленту в качестве основного носителя. Логика работы других устройств полностью учитывается логикой программ ввода телеграфной перфоленты, и они рассматриваются как дополнительные устройства. Это, однако, не означает, что они должны использоваться в меньшей степени.

Разновременность получения геологом информации, нужной для решения его целевых задач, приводит к использованию в ГЕОНАВТе нескольких процедур ввода данных. Если представить себе машинную модель геологического объекта в виде матрицы, строками которой являются пробы (векторы признаков в точках опробования), а столбцами — числовые характеристики признаков, то необходимо уметь вводить любую часть такой матрицы. ГЕОНАВТ имеет режимы первичного ввода (первое представление макета системе), доввода-удлинения и доввода-расширения для уже хранимых макетов. Поскольку контроль структуры данных выполняется в любом режиме, а ошибки в данных встречаются в любом случае, поскольку данные накапливаются частями. Для фактического получения удлиненного и (или) расширенного макета предусмотрена процедура их слияния. Она вызывается к работе по директиве пользователя или оператора в момент окончания накопления всех необходимых частей. Такова логика работы важнейшей части ГЕОНАВТа — части организации машинных массивов данных.

Работа с машинными массивами реализуется системными действиями — печать, корректировка, компоновка. Они дают возможность отобразить содержимое машинных массивов, внести семантические или структурные изменения в хранимые макеты. Особое внимание здесь уделено возможности формирования вторичных макетов на базе хранимых с целью изучения новых разрезов, горизонтов и других частей геологического объекта. Такие макеты получают свои оригинальные имена, хранятся наравне с первичными и имеют их статус. Принципы формирования различны. Это может быть выбор по граничным значениям пространственных координат, по интервалам опробования, по наименованиям пород, значению текстовых примечаний, индексам аномалии, по условию превышения или непревышения некоторых пороговых значений для любой группы признаков и т. д. или по комбинации перечисленных условий.

Модификация хранимых данных не ограничивается только их новой компоновкой. ГЕОНАВТ имеет интенсивно развивающийся блок предварительной обработки данных, который в будущем превратит его в информационно-вычислительный комплекс. В настоящее время в нем имеются программы нормирования исходных данных и пересчета геохимических данных из весовых процентов в атомные проценты. Первая процедура может быть применена к любым данным, хранимым ГЕОНАВТом. Любому ряду нормирующих данных пользователем может быть присвоено имя, используемое для мнемонических целей. Развитие блока пересчетов имеет целью минимизировать труд программистов, разрабатывающих проблемные программы, возложив реализацию общеупотребимых процедур на программы информационного обеспечения.

Системное действие «вывод», входящее в состав ГЕОНАВТа, позволяет формировать оперативные файлы данных, передаваемые обрабатывающим программам. Последовательность вывода информационных макетов в такие файлы определяется только пользователем или проблемной прог-

раммой и никак не связана с последовательностью ввода или компоновки данных. Сохранность оперативного файла не является функцией ГЕОНАВТа и целиком зависит от проблемных программ.

Быстрый поиск выводимых данных обеспечивается организацией хранимых данных как файла прямого доступа и тремя контурами адресных ссылок. Первый контур связывает имя владельца данных и имя геологического объекта с кодом пакета магнитных дисков, на котором хранятся соответствующие данные. Второй контур связывает имя информационного макета или его поисковый номер с ключами начальной и конечной записей, принадлежащих этому макету. Третий контур связывает имя проблемы (записи) или ее порядковый номер в макете с ключом, характеризующим ее расположение на пакете дисков.

Поскольку принятый в ГЕОНАВТ способ именования признаков имеет только формальные ограничения, то без дополнительных затрат средства системы ГЕОНАВТ позволили обеспечить первичной информацией серию программ петрохимических пересчетов и комплекс программ автоматизированной диагностики минералов. Для этого понадобилось только принять во внимание уровень внешней и машинной организации данных.

В любом случае применения системы ГЕОНАВТ доступ к хранимым данным для выполнения любого из системных действий разрешается только при совпадении защитного шифра, записанного на пакете данных с шифром, вводимым с пульта ЭВМ в момент работы.

В. Н. МАКАРОВ, А. А. СЕЛЕЗНЕВ, В. А. ТИМЧЕНКО,
И. Н. КРИЦУК, И. И. СИЛИН

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ КАРТА ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

Геохимические карты в последнее время вызывают заметный интерес. Общие принципы геохимического картирования впервые сформулированы А. Е. Ферсманом [1939] и в дальнейшем развивались А. А. Беусом и др. [1965], С. В. Григоряном [1974], А. А. Смысловым, Е. В. Плющевым [1968] и др. По мнению исследователей, первостепенной задачей геохимических карт является изображение особенностей распределения и миграции химических элементов в горных породах с целью выделения прямых и косвенных геохимических поисковых признаков рудоносности.

Единого принципа составления таких карт пока нет.

При составлении геохимической карты Южной Якутии использованы рекомендации сессии Межведомственного совета по проблеме «Научные основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых» по теме «Геохимические карты и их использование при поисках рудных месторождений» (Хабаровск, 1979 г.).

Большая часть территории Южной Якутии представлена выступом древнейшего кристаллического основания Сибирской платформы — до-кембрийскими породами Алданского щита, перекрытого разобщенными реликтами протерозойско-кембрийских и мезозойских отложений. На севере фундамент погружается под спокойно лежащие кембрийские платформенные образования, а на крайнем юге, по зоне Станового краевого шва, граничит со Становым складчатым поясом. Осадочные и магматические геологические формации объединены в восемь структурно-формационных комплексов, образовавшихся в четыре этапа с разным геотектоническим режимом: геосинклинальным, протоплатформенным, платформенным и текtonомагматической активизации.

В наиболее древний геосинклинальный этап развития территории сформировались образования иенгрского, тимптоно-джелтулинского и субганского структурно-формационных комплексов архейского времени.

В нижнем протерозое сформирован удоканский структурно-формационный комплекс в условиях протоплатформенного режима. Платформенный этап представлен образованиями верхнепротерозойского и нижнепалеозойского комплексов. В условиях тектономагматической активизации областей сформировались мезозойский и кайнозойский структурно-формационные комплексы.

Слабая геохимическая изученность этой огромной территории и невозможность ее равномерного и быстрого опробования обусловили необходимость создания «каркасной сети» путем геохимических маршрутов вдоль основных водотоков. Каркасная сеть послужила основой для обработки архивных данных. Опробование велось по методике геохимического изучения твердого (механического) и ионного (химического) стока, разработанной в Центральной геохимической партии ПГО «Якутскгеология».

В пунктах наблюдений, расположенных в устьевой части водотоков III—IV порядка, брались шлиховая, донная, гидро- и биогеохимическая пробы. Отдельно изучались горные породы. Общая площадь, охваченная исследованиями, составила 290 тыс. км², длина изученных водотоков — 4200 км, число опорных пунктов наблюдений — 1368. Все пробы анализировались в лабораториях ПГО «Якутскгеология» и частично во ВСЕГЕИ и Ленинградском горном институте. Помимо спектрального полуколичественного анализа на 36 элементов проводилось химико-спектральное определение золота, адсорбционное — ртути, химическое — фтора и ряда компонентов природных вод. Контроль качества аналитических данных обеспечивался проверкой расхождений партий и между партиями проб, результатами внешнего контроля. Обработка данных и построение карт проводились на ЭВМ ЕС-1020 в вычислительном центре ПГО «Якутскгеология» методом многомерных полей [Евдокимов, 1978].

Результат обработки — создание комплекта региональных геохимических карт, по существу — геохимического атласа Южной Якутии: геохимической карты ионного стока, отражающей результаты гидрогеохимического и биогеохимического опробования водотоков; геохимической карты твердого стока, на которой показаны результаты донного и шлихового опробования водотоков; геохимической карты коренных пород и комплексных геохимических аномалий. При составлении помимо геохимических наблюдений использованы геологические карты разных масштабов, карты интенсивности магнитного поля и локальных аномалий гравитационного поля, схемы дешифрирования космических снимков, карты локальных геохимических аномалий, карты полезных ископаемых Алданского щита, результаты спектральных анализов проб коренных пород.

Особенность полевых наблюдений обусловила необходимость интерполяции геохимического признака в пределах профиля опробования. Влияние признака между профилями распространялось только на площадь водосбора, охарактеризованную пробой. Дальнейшая экстраполяция признака производилась на основе геологического строения территории, вспомогательных карт и архивных результатов площадного геохимического опробования.

Высокая степень дифференциации использованных геохимических методов по объектам опробования природной среды позволила дать комплексное геохимическое описание Южной Якутии.

В таблице дана краткая геохимическая характеристика основных структурно-формационных комплексов по этапам геотектонического развития региона.

Длительность и сложность геологических процессов, сформировавших современный облик щита, отразились в многообразии известных полезных ископаемых как по возрастным, так и по генетическим признакам. Это объясняет сложность металлогенического районирования территории Южной Якутии. На схеме металлогенического районирования отмечено 45 металлогенических районов и площадей, разделенных по ведущим полезным ископаемым на халько-, лито- и сидерофильные. К халькофильным металлогеническим районам отнесены молибденоносные и потенци-

Геохимическая характеристика основных структурно-формационных комплексов Южной Якутии

Этап геотектонического режима	Структурно-формационный комплекс	Элементы, накапливающиеся в материале стока	
		жидкого	твердого
Геосинклинальный	AR ₁ AR ₂ AR ₃	Ni Mo Cr Cu Ge Cr Zn Ni T R Bi	Ni Mo Ti Cr W Cr W Ti — Ga P Mo Zn Zn Mo Ni Ga
Протоплатформенный	PR ₁	Ag Y Nb	B Nb Ni P
Платформенный	PR ₂ V — C	Pb Mn Sn Y Ti Pb Bi Sb Cu B Li	Ti Y(Mo Sn) B Y Ga
Тектономагматической активизации	MZ — KZ	Mn Bi Zn Co W Ag	Cu Ge Ag Pb

ально медные, к лиофильным — флогопито-, мусковито-, апатитоносные, редкометалльные, к сидерофильным — все железорудные, угольные, никеленосные. По количеству выделенных металлогенических районов Алданский щит в целом имеет сидеро-лито-халькофильный облик (практически без преобладания какой-либо одной группы элементов).

Анализ распределения полезных ископаемых Алданского щита по времени образования полезного компонента показал приуроченность большинства металлогенических районов к субганскому структурно-формационному комплексу (AR₃) — железо, флогопит, апатит, мусковит, редкие металлы, молибден. Вторым по значимости и интенсивности проявлений полезных ископаемых является мезозойский структурно-формационный комплекс, с которым связано формирование всех золоторудных, угольных и большинства молибденовых месторождений и проявлений. С раннепротерозойским (удоканским) структурно-формационным комплексом связаны проявления флогопита, апатита, никеля и все потенциально меденосные площади.

Основные проявления полезных ископаемых представлены железом, марганцем, титаном, хромом, кобальтом, никелем, вольфрамом (сидерофильной группой), медью, цинком, свинцом, мышьяком, ртутью, молибденом (халькофильной группой), редкими металлами, апатитом, флогопитом, мусковитом (лиофильной группой). По распространению и составу полезных ископаемых Алданский щит выделяется соотношением проявлений полезных ископаемых халько-, сидеро- и лиофильных как 1 : 1 : 1,3.

Наиболее распространены геохимические аномалии группы халькофильных элементов (Pb, Zn, Mo).

Соотношение состава и количества проявлений полезных ископаемых и геохимических аномалий свидетельствует о значительном преобладании группы халькофильных элементов среди геохимических аномалий.

ЛИТЕРАТУРА

- Беус А. А., Рогожин С. П., Алентьев Ю. А. Методические указания по геохимическому картированию при геологосъемочных работах м-ба 1 : 200 000 и 1 : 50 000.— М., 1965.— 78 с.
- Геохимические карты и их использование при поисках рудных месторождений/Под ред. Е. А. Кулиш.— Хабаровск, 1979. Т. I.— 138 с.; т. II— 112 с.
- Григорян С. В. Геохимические методы при поисках эндогенных рудных месторождений.— М.: ИМГРЭ, 1974.— 216 с.
- Евдокимова Е. Н. Автоматизированная система обработки геолого-геохимической информации методом многомерных полей.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск: Наука, 1978, с. 3—26.
- Принципы и методика геохимических исследований при прогнозировании и поисках рудных месторождений.— Л.: Недра, 1979.— 247 с.
- Смыслов А. А., Плющев Е. В. Основные принципы и методы составления радиогеохимических карт.— Л., 1968, с. 104—134.
- Ферсман А. Е. Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых.— М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1939.— 446 с.

Е. И. ЗУБОВ, Е. Б. ВЫСОКООСТРОВСКАЯ, А. И. КРАСНОВ,
Д. С. ЗЕЛЕНЕЦКИЙ

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ АЭРОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПОНЕНТНОГО АНАЛИЗА

В последние годы отмечается существенный прогресс в развитии аэрогеофизических методов исследования земной коры. При поисках месторождений различных видов полезных ископаемых, геологическом картировании и геохимических исследованиях широкое применение находит аэрогамма-спектрометрический метод (АГС) раздельных определений урана (радия), тория и калия [Воробьев и др., 1977; Высокоостровская, Краснов, 1975; Зеленецкий и др., 1976; Техническая инструкция..., 1977]. При аэропоисковых работах в СССР используются высокочувствительные гамма-спектрометры с объемом кристаллического детектора до 37 л, входящие в состав комплексной многопараметровой аэрогеофизической станции. Минимальные концентрации радиоактивных элементов, которые могут достаточно надежно фиксироваться с воздуха (порог чувствительности метода), колеблются в пределах: $(0,5-0,7) \cdot 10^{-4}\%$ урана, $(1,5-2,0) \cdot 10^{-4}\%$ тория, $0,3-0,6\%$ калия.

Применяемая методика аэрогамма-спектрометрической съемки представляет стройную систему операций, позволяющих в полете непрерывно регистрировать концентрации радиоактивных элементов, записывать их на магнитную пленку и одновременно автоматически анализировать поступающую информацию с выдачей сигнала перспективности участка с помощью специального бортового интерпретационного устройства.

Окончательная обработка аэрогеохимических данных осуществляется в вычислительных центрах с представлением результатов интерпретации в виде аэорадиогеохимических и прогнозных карт с помощью алгоритмов, учитывающих геологическое строение, ландшафтные особенности и характер взаимосвязей элементов в ореолах [Воробьев и др., 1977; Зеленецкий и др., 1976].

Для выделения площадей при поисках широкого круга полезных ископаемых авторами использован подход, обеспечивающий реализацию основных принципов радиогеохимического картирования в условиях ограниченной априорной информации.

В основе его лежат следующие предпосылки. Исследования, выполненные в различных рудных провинциях СССР [Воробьев и др., 1977; Высокоостровская, Краснов, 1975], показали, что вариации литологического состава горных пород, генетического типа и мощности рыхлых образований приводят, как правило, к пропорциональному изменению интенсивности спектра гамма-излучения во всем диапазоне регистрируемых энергий. Причем значительная трансформация геохимического поля при АГС съемке позволяет удовлетворительно аппроксимировать свойственный неизмененным горным породам характер взаимосвязи между средними значениями измеряемых параметров линейной моделью (рис. 1).

Согласно исследованиям [Верховская, 1973], для заведомо неоднородной геохимической ассоциации величина коэффициента линейной корреляции отражает в основном синхронность в поведении элементов при переходе из одной генеральной совокупности в другую и в меньшей степени зависит от статистической корреляции в каждой однородной выборке. В соответствии с этим характеристикой фонового состояния радиогеохимического поля являются высокие значения коэффициентов парной корреляции между данными каналов блока сортирований аэрогамма-спектрометра [Балынский и др., 1980; Болтнева и др., 1980].

Наложенные, в том числе и рудные, процессы приводят к существенному перераспределению радиоактивных элементов, которое проявляется в изменении их первоначальных концентраций и, как следствие, в нару-

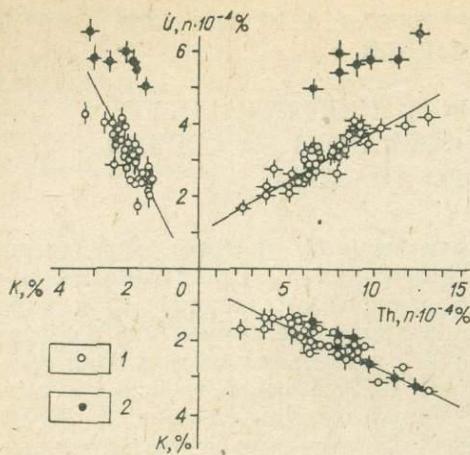


Рис. 1. Характер связи элементов в горных породах (1) и ореолах рассеяния месторождений редких металлов (2) одного из районов.

шении линейности и характера взаимосвязей (см. рис. 1).

Следовательно, задачу выделения площадей по результатам радиогеохимического картирования на основе АГС данных можно сформулировать как локализацию областей с маловероятными для неизмененных пород значениями и корреляциями регистрируемых параметров.

Для решения поставленной задачи в каждой точке исследуемого пространства необходимо выделить вектор фоновых составляющих концентраций урана, тория и калия $q^\Phi = \{q_U^\Phi, q_{\text{Th}}^\Phi, q_K\}$ со структурой связей между элементами, характерной для неизмененных горных пород, и оценить степень соответствия его измеренным значениям поля q из соотношения:

$$\Delta q = q - q^\Phi, \quad (1)$$

где Δq — вектор значений аномальных составляющих исходных признаков, характеризующий сформированный совокупностью наложенных процессов облик анализируемой геохимической системы. Из (1) следует, что ореолы повышенных значений Δq соответствуют участкам горных пород с нарушенным первично-конституционным распределением элементов.

Разложить исходные АГС поле в соответствии с (1) на отдельные составляющие, обусловленные воздействием независимых природных факторов, позволяет метод главных компонент [Белонин и др., 1971]. На основе изложенного предлагается следующий алгоритм автоматизированного построения радиогеохимических карт:

1) предварительная обработка АГС информации, включающая в себя вычисление содержаний урана (по Bi^{214}), тория (по Tl^{208}) и калия (по K^{40}) в узлах регулярной сети, введение всех настроенных и увязывающих поправок, выделение локальных аномалий гамма-поля и сглаживание флуктуационных помех;

2) статистическая обработка аэроданных, направленная на вычисление элементов и анализ внутренней структуры корреляционной матрицы R , характеризующей взаимосвязь АГС признаков;

3) вычисление вектора значений фонового фактора. Матрица R отражает главным образом характер связей, свойственный фоновому состоянию радиогеохимического поля в пределах исследуемой площади. Поэтому в качестве «фонового» фактора всегда интерпретируется тот собственный вектор матрицы R , который совпадает с основным направлением изменчивости рассматриваемой геохимической системы. На этом и последующих этапах в вычислениях участвуют все точки наблюдения без исключения;

4) расчет и нормирование элементов матрицы аномальных (наложенных) составляющих значений исходных признаков ΔQ ;

5) графическое изображение с помощью выводных устройств ЭВМ прогнозно-геохимической нагрузки радиогеохимической карты.

К аномальным относятся наблюдения, для которых справедливо требование:

$$\Delta q_{ji} = \max_l \{ |\Delta q_{ji}| \} / (|\Delta q_{ji}| > L) \wedge (j = l), \quad (2)$$

где Δq_{ji} — величина аномальной составляющей главного элемента гео-

A

Б

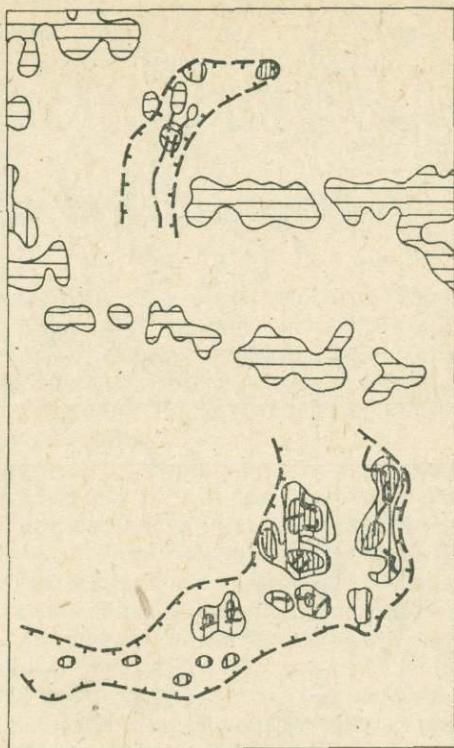
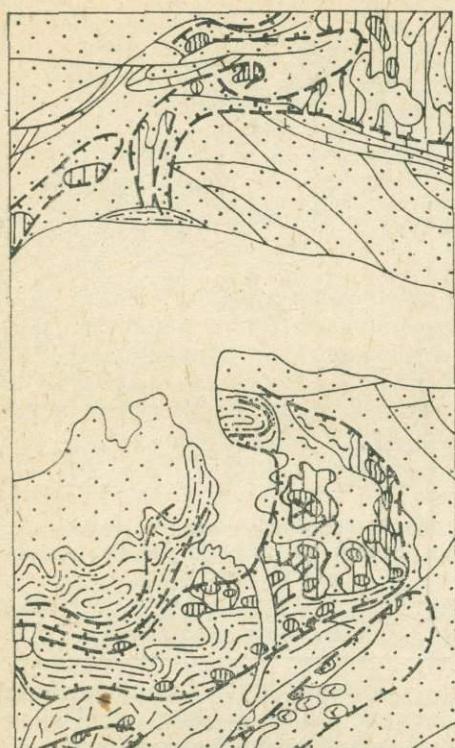


Рис. 2. Прогнозные карты по материалам аэромагма-спектрометрической съемки одного из районов докембрийского щита, построенные по методике Высокоостровской, Краснова, [1975] (А) и авторов статьи (Б).

1 — терригенные породы; 2 — вулканические породы кислого (а) и основного (б) составов; 3 — кристаллические сланцы; 4 — тектонические нарушения; 5 — рудные тела; 6 — границы радиогеохимических зон; 7—9 — ореолы аномальных значений наложенной составляющей концентрации урана (от низких к повышенным).

химической нагрузки (j) в i -м измерении; L — порог, определяющий границы нормального геохимического фона; $l = U, Th, K$.

Наблюдения, не удовлетворяющие условиям (2), дифференцируются по величине измеренных содержаний j -го элемента (q_j) и представляются на карте в единицах регионального фона.

Фрагмент прогнозной карты, составленной с помощью ЭВМ для одного из районов докембрийского щита, приводится на рис. 2.

Исходными данными послужили материалы АГС съемки, обработанные на ЭВМ в соответствии с изложенным выше алгоритмом. Для сравнения на геологическую схему участка (см. рис., 2, а) вынесены ореолы повышенных и аномальных концентраций урана, выделенные с использованием традиционной методики [Высокоостровская, Краснов, 1975].

По результатам обработки АГС данных на обеих картах намечены контуры зон с нарушенным распределением элементов, в пределах которых сосредоточены все известные в настоящее время рудоносные горизонты. Однако при традиционном подходе к вычислению пределов нормального геохимического фона в разряд перспективной попала также значительная часть площади, в пределах которой развиты определенные горизонты туфогенных пород.

На величине значений вектора Δq_U влияние отмеченного фактора практически не сказалось, что позволило локализовать перспективные площади с минимумом ошибок второго ряда.



Рис. 3. Факторные полизлементные карты одного из рудных районов докембрийского щита.

a — F_1 ; *b* — F_2 ; *c* — F_3 ; 1 — месторождения; 2 — рудопроявления; 3 — проявления редкometалльной минерализации.

Обычно при компонентном анализе АГС данных надежная смысловая интерпретация возможна только для первой главной компоненты, описывающей основную долю изменчивости исходных признаков. Поэтому изложенная методика радиогеохимического картирования в общем виде пред-

полагает выделение лишь интегральных аномальных составляющих концентраций радиоактивных элементов, обусловленных суммарным воздействием всей совокупности наложенных геологических процессов.

Однако в отдельных благоприятных ситуациях, когда с конкретными геохимическими процессами идентифицируются (с известной условностью) главные компоненты, имеющие значимый вес в суммарной дисперсии системы, возможно более дробное разложение аномального радиогеохимического поля, в частности, на эндо- и экзогенную составляющие, что особенно важно при АГС поисках эндогенного оруденения в сложных геолого-ландшафтных условиях. В этом случае некоторые вопросы радиогеохимического картирования могут быть решены непосредственно на основе анализа собственно факторных (полизлементных) карт, отражающих закономерности пространственного распределения ассоциаций радиоактивных элементов, обусловленных воздействием тех или иных геологических процессов. Причем карты значений подчиненных факторов, по существу, характеризуют типоморфные ассоциации только аномальных составляющих исходных признаков, т. е. являются в известной степени синтезом совокупности рассмотренных выше карт Δq .

На рис. 3 приведен фрагмент факторных полизлементных карт, построенных по материалам АГС съемки, выполненной в одном из районов докембрийского щита.

Для достоверности выводов использовались материалы наземной заверки, включавшей в себя специализированные геолого-геофизические работы.

Проявления редкometалльной минерализации приурочены к периферии обширной аномально-радиоактивной зоны и располагаются в предел-

Таблица 1

Коэф. корреляции			Признак	Факторные нагрузки		
Уран	Торий	Калий		F_1	F_2	F_3
I	0,52	0,42	Уран	0,80	0,44	0,40
	I	0,47	Торий	0,83	0,15	-0,54
		I	Калий	0,77	-0,61	0,16
			Вес фактора, %	64,7	19,7	15,8

Примечание. Минимальная абсолютная величина коэффициентов корреляции и факторных нагрузок, значимо отличимых от нуля, при уровне значимости 0,5.

лах наиболее сложнодифференцированных участков поля, что существенно затрудняет использование прямых поисковых признаков оруденения для локализации перспективных площадей непосредственно по картам измеренных значений АГС параметров. Неоднозначность интерпретации материалов АГС съемки усугубляется влиянием последующих гипергенных перераспределений элементов, главным образом уранового ряда.

С целью приблизительной оценки роли и интенсивности основных геологических факторов, ответственных за формирование современного облика радиогеохимического поля исследуемого участка, выполнен компонентный анализ АГС данных, результаты которого приведены в табл. 1.

Из данных следует, что характеристикой наиболее типичного, фонового состояния наблюденного радиогеохимического поля является первая главная компонента (F_1), описывающая основную долю изменчивости анализируемой системы (64,4%). Признаковая структура F_1 (знаки и абсолютные величины факторных нагрузок) подчеркивает, что горным породам участка свойственно согласованное изменение фоновых содержаний урана, тория и калия.

Как показали результаты наземных геологических исследований, увеличение концентраций радиоактивных элементов в краевой части гранито-гнейсового массива связано с процессами фельдшпатизации вмещающих кристаллических сланцев. Причем содержания урана, тория и калия возрастают пропорционально увеличению кварц-полевошпатового и полевошпатового вещества в породах (табл. 2). Величина F_1 также монотонно возрастает от -1,5 до +1,7 в этом ряду. Следовательно, в данном случае первую главную компоненту можно интерпретировать как фактор «породной дифференциации» радиоактивных элементов в связи с дорудными процессами плутонометаморфизма.

Аномальное повышение величины F_1 в приконтактовой зоне массива (см. рис. 3, а) подтверждает сделанное по результатам наземных исследо-

Таблица 2

Порода	Кол-во наблюдений	Среднее содержание			
		$q_{U \cdot n \cdot 10^{-4} \%}$	$q_{Th \cdot n \cdot 10^{-4} \%}$	$q_K \%$	F_1
Актиноолит-хлорит-амфиболовый сланец	13	4,5±0,5	7,9±1,1	1,2±0,1	-1,5
Гранат-ставролит-биотитовый сланец	23	3,3±0,4	6,9±1,8	1,9±0,3	-1,2
Полевошпатовый гранат-ставролит-биотитовый сланец	13	6,1±0,8	8,9±1,9	2,6±0,4	-0,7
Биотит-полевошпатовый очковый гнейс	15	6,6±1,1	16,4±2,5	5,2±0,4	-0,1
Гранито-гнейс	30	8,8±1,0	32,2±1,6	5,4±0,4	0,7
Гнейсо-гранит	26	8,2±1,0	48,7±1,4	6,9±0,3	1,2
Кварц-полевошпатовый мигматит	26	10,7±1,1	60,2±7,0	6,5±0,7	1,7

Примечание. Доверительные интервалы средних вычислены при уровне значимости 0,05. Породы расположены в направлении возрастания кварц-полевошпатового вещества.

ваний предположение о том, что наиболее интенсивно процессы дорудной мобилизации и перераспределения урана, тория и калия проявились на внешнем фронте гранитизации. В целом карта значений фактора «попродной дифференциации» отражает особенности геологического строения территории, совместно с данными табл. 2 она использовалась для уточнения материалов геологического картирования.

Наличие латеральной зональности в пределах совмещенных калий-уран-ториевых ореолов рассеяния, обусловленных наложенными процессами гидрослюдистых изменений горных пород и гипергенного перераспределения радиоактивных элементов, нашло отражение в признаковых структурах второй (F_2) и третьей (F_3) главных компонент.

С точки зрения поисков редкometальных месторождений, рудные поля которых фиксируются по АГС данным локальными приращениями концентраций урана и тория при индифферентном в целом поведении калия, наибольший практический интерес представляет вторая компонента. Она имеет значимые положительные нагрузки на уран и торий и отрицательную — на калий, т. е. может рассматриваться в данном случае как «рудный» фактор. Характерно, что аномальная величина «рудного» фактора (см. рис. 3, б) наблюдается в местах максимальной концентрации редкотектальной минерализации.

Суммарная площадь ореолов аномальных значений F_2 на этом участке составляет около 8—10% от общей площади съемки. Это в несколько раз меньше размеров участков, выделенных для постановки наземных поисковых работ непосредственно по картам измеренных содержаний элементов. Причем существенно сократилось и количество ошибок первого рода (пропуск рудных объектов), особенно в центральной части площади, в поле относительно невысоких значений исходных АГС признаков.

Третий фактор (F_3) характеризует, по существу, большую гипергенную подвижность урана и, в некоторой степени, калия по сравнению с торием. Условно он назван фактором «селективного выщелачивания». Карта значений F_3 (см. рис. 3, б) подчеркивает области современного выноса и вторичной аккумуляции урана в мочажинах, краевых частях болот, поверхностных горизонтах почв и т. п.

Предлагаемый подход носит универсальный характер и может быть использован для прогнозирования по аэроданным широкого спектра месторождений полезных ископаемых (бокситы, золото, tantal, ниобий, полиметаллы и др.), обеспечивая автоматический режим обработки и высокое качество прогнозных заключений.

ЛИТЕРАТУРА

- Балынский И. Д., Василенко В. И., Пегоев А. Н. и др. Естественная радиоактивность почв в горных районах СССР.— В кн.: Труды Ин-та прикладной геофизики. Вып. 43. М., 1980, с. 116—152.
- Белоног М. Д., Татаринов И. В., Калинин О. М. и др. Факторный анализ в нефтяной геологии.— Геология, методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. М.: ВИЭМС, 1971.— 56 с.
- Болтнева Л. И., Ионов В. А., Кузнецова З. В. и др. О связи полей концентрации радиоактивных элементов в поверхностных образованиях с геологическим строением.— В кн.: Труды прикладной геофизики. Вып. 43. М., 1980, с. 37—55.
- Верховская Л. А. Интерпретация выборочного коэффициента корреляции, вычисленного для неоднородной геохимической ассоциации.— Экспресс-информация ВИЭМС, сер. Математические методы исследований в геологии, 1973, №2, с. 8—20.
- Воробьев В. П., Ефимов А. В., Альтшuler М. И. и др. Аэrogамма-спектрометрический метод поисков рудных месторождений.— Л.: Недра, 1977.— 215 с.
- Высокоостровская Е. Б., Краснов А. И. Основные принципы и методика составления радиогеохимических карт по аэрогамма-спектральным данным.— В кн.: Методы геофизики. Вып. 11. Л.: Недра, 1975, с. 61—70.
- Зеленецкий Д. С., Семенова О. Г., Попов Б. П. Автоматизированная система обработки комплексной аэрогеофизической информации (математическое обеспечение).— В кн.: Аэро-геофизические методы. Л.: Недра, 1976, с. 43—56.
- Техническая инструкция по аэрогамма-спектрометрической съемке.— М.: Недра, 1977.— 188 с.

МНОГОМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ КОСМОАЭРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Информация, полученная в результате дешифрирования космоснимков, позволяет в глобальном, региональном и детальном масштабе изучать строение земной поверхности и выявлять основные закономерности пространственного размещения полезных ископаемых. Вместе с тем выяснение этих закономерностей на современном этапе невозможно без составления геохимических карт, позволяющих устанавливать особенности распространения химических элементов в пространстве. Наиболее рациональным способом построения геохимических карт, по нашему мнению, является метод автоматизированного построения карт по результатам лitoхимических съемок, разработанный в Вычислительном центре Иркутского государственного университета в содружестве с Институтом геохимии СО АН СССР [Евдокимова, Китаев, 1973].

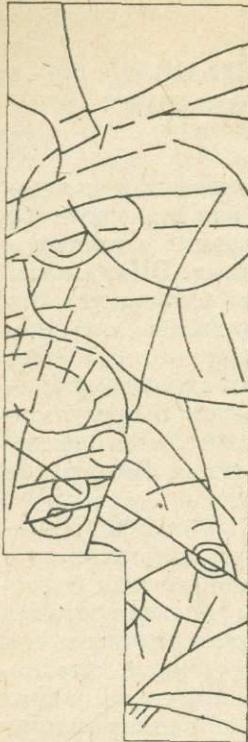
Дешифрирование космических снимков масштаба 1 : 1 000 000 — 1 : 500 000, дающее большую структурно-формационную информацию о территории, должно сопровождаться составлением мелкомасштабных геохимических карт, позволяющих совместно с данными дешифрирования космоснимков выделять рудные районы, поля, рудные узлы значительных масштабов, а также контролирующие их структуры (структурно-металлогенические зоны). Для ускоренного составления геохимической карты больших территорий наиболее перспективно (по В. В. Поликарпочкину [1980]) опробование потоков рассеяния рудных элементов с плотностью отбора проб от одной пробы на 5—10 км² до одной на 30—50 км². Эти работы позволяют выделить площади рудоносных районов для комплексных среднемасштабных (1 : 200 000 — 1 : 100 000) поисково-съемочных работ. При дешифрировании среднемасштабных космоснимков использовались геохимические карты, построенные по потокам рассеяния при плотности опробования 1—2 точки на 1 км², что позволяет выявить рудные поля и месторождения определенного рудно-формационного типа, а также провести подсчет прогнозных запасов по формулам А. П. Соловова [1959, 1978]. При комплексном детальном составлении структурных карт по дешифрированию космоснимков масштаба 1 : 50 000 — 1 : 25 000 построение геохимических карт должно базироваться на изучении потоков и вторичных ореолов рассеяния элементов с плотностью отбора по потокам 5—10 проб на 1 км² и более, тогда в итоге обеспечивается выход на локальные участки коренного оруденения.

В основу статьи положены результаты, полученные при проведении групповой геологической съемки масштаба 1 : 50 000, сопровождавшейся лitoхимической съемкой по потокам рассеяния по методике А. Д. Ананченко [1979а], И. И. Сонина и В. А. Коршунова [1975]. Геологическая съемка производилась в пределах внешней и внутренней зон мезозойского вулканогенного пояса, являющегося частью Тихоокеанского вулканогенного кольца. Примером комплексной интерпретации геологических объектов, дешифрирующихся на мелкомасштабных космических снимках (КС), и особенностей геохимического поля может служить космогеохимическая карта внешней части мезозойского вулканогенного пояса на площади 1,6 тыс. км² (рис. 1).

Для разрывной тектоники рассматриваемого района характерно наличие системы протяженных разломов и ряда кольцевых структур, определяющих размещение интрузивных, субвулканических тел, жерловых образований и площадей гидротермально измененных пород.

По данным дешифрирования КС большинство кольцевых структур приурочено к зонам пересечения линейных и дугообразных тектонических элементов. Размеры большинства структур колеблются в поперечнике от 4—5 до 15—30 км, при этом часто более мелкие кольцевые структуры

Рис. 1. Космогеохимическая карта внешней части мезозойского вулканогенного пояса. Видны линейные и кольцевые элементы, дешифрирующиеся на КС.



расположены как внутри, так и на периферии более крупных кольцевых структур. Результаты дешифрирования КС позволяют проследить многоэтапность формирования ряда кольцевых структур, выражющуюся в наложении более поздних структур меньшего диаметра на более ранние и смещении центральных частей последующих структур по отношению к предшествующим.

Густота линий и структурных элементов, дешифрирующихся на КС, настолько велика, что на первый взгляд невозможно выделить информацию о структурах, играющих наиболее важную рудоконтролирующую роль. Рудоносными и рудовмещающими обычно являются не те крупные элементы, отчетливо фиксирующиеся на КС, а системы разрывных нарушений более высокого порядка, располагающиеся, как правило, в непосредственной близости от узлов пересечения крупных элементов. Системы разрывных нарушений более высокого порядка, вероятно, являлись главными факторами, обеспечивающими проникаемость земной коры для рудогенных флюидов. Эти

системы разрывных нарушений, в свою очередь, дешифрируются на детальных КС и аэрофотоснимках (АС). Кроме структурно-тектонических элементов КС и АС фиксируют структурно-вещественные и ландшафтно-геохимические особенности земной поверхности, создающие индивидуальное фотоизображение вещественного поля отдельных геологических объектов.

Одним из наиболее важных моментов производственных геологосъемочных и геолого-поисковых работ является вопрос о качественной и количественной оценке металлоносности геологических объектов, дешифрирующихся на КС и АС, который возник перед авторами при создании карты закономерностей размещения рудных полезных ископаемых [Ананченко, 1979].

Металлогеническая специализация дешифрирующихся кольцевых структур, например, отвечает не только специализации конкретной структуры и составляющим ее системам разломов, но и соответствует специализации той металлогенической зоны (или зон), в которой находится рассматриваемая структура. При наложении ряда разновозрастных структур получает отражение металлогеническая специфика всех предшествующих структур, становящихся целиком или в отдельных своих частях попеременно рудоподводящими. Так, кольцевые структуры, приуроченные к длительно живущим зонам глубинных разломов, отражают металлогеническую специализацию как самой структуры, так и крупного линеамента, с которым структура связана. Гидротермальная деятельность, обычно проявляясь в последние этапы формирования структур района, чаще всего наложена на структуры всех предшествующих этапов развития. Выявить металлогеническую специализацию отдельных линейных зон, структур, выделенных по КС, аддитивность наложенных участков в случае телескопированных структур можно лишь изучая геохимическую характеристику не только площади отдельной зоны, структуры, но и рассматривая геохимическую специализацию вне их пределов. Значительную помощь при выявлении металлогенической специализации геологических объектов, выявленных по дешифрированию КС и АС, оказала комплексная интерпретация результатов литохимической съемки по потокам рассеяния

с помощью метода многомерного анализа на ЭВМ по В. Н. Евдокимовой и Н. А. Китаеву [1973].

В основе метода лежат разделение всей исследуемой совокупности точек на однородные классы и выявление наиболее часто встречающихся сочетаний (ассоциаций) химических элементов. Машинная обработка геохимической информации проводилась путем анализа коэффициентов аномальности (КА) 24 химических элементов (Cu, Zn, Pb, Mo, Ag, Sn, As, W, Bi, Ni, Co, Cr, Mn, Ba, Sc, Ti, Li, Be, Nb, Y, Zr, P, Ga, B) по 3885 точкам опробования. $KA = C_x/C_\Phi$, где C_x — содержание элементов в данной точке опробования; C_Φ — его фоновое содержание.

Разделение фактического материала геохимических наблюдений проведено путем использования метода главных компонент с учетом удовлетворения критерию близости в признаковом пространстве точек, принадлежащих одному классу. Разделение выявило 54 класса, характеризующихся определенными сочетаниями химических элементов. Количественное геохимическое описание геологического пространства и последующее разделение его на участки геохимических аномалий и нормального геохимического поля производились авторами по принципу соответствию КА более 3,0 и менее 3,0, что позволило объединить выявленные классы геохимических ассоциаций в 23 группы:

- 1) $\frac{Bi}{11,2} \frac{Sn}{4,2} \frac{Ag, Li}{3,4} \frac{Ni}{2,9} \frac{Mo}{2,5}$
- 2) $\frac{Bi}{4,3} \frac{Sn}{3,3} \frac{B}{3,1} \frac{Ag}{3,0} \frac{Zn}{2,9} \frac{Li}{2,6} \frac{Cr}{2,6} \frac{Ni}{2,6} \frac{Pb}{2,6}$
- 3) $\frac{Mo}{5,3 - 4,7} \frac{Ag}{3,4} \frac{Cr}{2,7 - 2,3} \frac{Sn}{2,3}$
- 4) $\frac{Mo}{3,3} \frac{B}{2,2} \frac{Li}{2,2} \frac{Sn}{2,1} \frac{Pb}{2,1} \frac{Zn}{2,1} \frac{Cr}{2,1}$
- 5) $\frac{Mn}{4,0} \frac{Ba}{2,2}$
- 6) $\frac{Ag}{9,0 - 4,1} \frac{Mo}{6,8 - 3,4} \frac{As}{3,9} \frac{Sn}{2,8} \frac{Pb}{2,8} \frac{Zn}{2,8} \frac{Li}{2,0} \frac{B}{2,0}$
- 7) $\frac{Ag}{14,0 - 3,2} \frac{Pb}{5,5 - 3,3} \frac{Zn}{4,4 - 2,3} \frac{Sn}{3,2} \frac{As}{3,5} \frac{Sc}{5,3} \frac{Y}{3,2} \frac{B}{2,6 - 2,0} \frac{Li}{2,0} \frac{Ni}{2,0} \frac{Cr}{2,0} \frac{Ti}{2,0}$
- 8) $\frac{Li}{4,0} \frac{Sn}{2,5 - 2,0} \frac{Zn}{2,0} \frac{Pb}{2,0} \frac{Ga}{2,0}$
- 9) $\frac{Li}{2,4 - 2,2} \frac{Pb}{2,2 - 2,0} \frac{Zn}{2,0} \frac{Ag}{2,1} \frac{B}{2,0 - 1,2} \frac{Sn}{1,2} \frac{Cu}{1,2} \frac{Ba}{1,2}$
- 10) $\frac{B}{3,7 - 3,6} \frac{Cr}{2,9 - 2,4} \frac{Sc}{2,4}$
- 11) $\frac{B}{2,5 - 1,8} \frac{As}{2,5} \frac{Pb}{2,2 - 2,0} \frac{Sn}{2,0} \frac{Mo}{2,0}$
- 12) $\frac{Ba}{2,0} \frac{Zn}{1,8 - 1,4} \frac{Li}{1,4} \frac{Ag}{1,4} \frac{Mo}{1,4} \frac{Pb}{1,4} \frac{Cu}{1,4} \frac{Ni}{1,4} \frac{Co}{1,4} \frac{Cr}{1,4} \frac{V}{1,4}$
- 13) $\frac{Sn}{4,1} \frac{Pb}{2,6 - 2,0} \frac{Zn}{2,0} \frac{Mo}{2,0} \frac{Cr}{2,0} \frac{Li}{2,0}$
- 14) $\frac{Sc}{16,5 - 6,1} \frac{Zr}{4,4 - 3,9} \frac{Ti}{3,4 - 3,0} \frac{Ag}{2,7 - 2,0} \frac{Ba}{2,0} \frac{Mn}{2,0}$
- 15) $\frac{Sc}{5,4 - 3,0} \frac{Zr}{4,5 - 2,6} \frac{Ti}{2,7 - 2,0} \frac{Ag}{2,0} \frac{Ba}{2,0}$
- 16) $\frac{Sc}{2,8 - 2,1} \frac{Zr}{2,5} \frac{Ti}{2,4 - 2,2} \frac{Ba}{2,0 - 1,7} \frac{Ag}{1,7} \frac{Mo}{1,7}$
- 17) $\frac{Zn}{3,9 - 3,8} \frac{Cr}{3,9} \frac{Pb}{3,2} \frac{Ag}{3,1} \frac{Sn}{2,5 - 2,1} \frac{Mo}{2,1} \frac{As}{2,1}$

- 18) $\frac{\text{Zn}}{2,1} \frac{\text{Cr}}{2,0} \frac{\text{B}}{—} \frac{\text{Li}}{—} \frac{\text{Sn}}{1,9 — 1,2} \frac{\text{Cu}}{—} \frac{\text{Pb}}{—} \frac{\text{Ag}}{—}$
- 19) $\frac{\text{Pb}}{15,9} \frac{\text{Ag}}{8,7} \frac{\text{Zn}}{8,4} \frac{\text{Li}}{3,5}$
- 20) $\frac{\text{Pb}}{10,0 — 6,2} \frac{\text{Ag}}{4,4 — 2,5} \frac{\text{Zn}}{3,3 — 2,2} \frac{\text{Ti}}{—} \frac{\text{Li}}{—} \frac{\text{Li}}{—}$
- 21) $\frac{\text{Pb}}{4,9 — 3,7} \frac{\text{Zn}}{4,4} \frac{\text{Ag}}{3,5} \frac{\text{Sn}}{2,7} \frac{\text{Li}}{—} \frac{\text{Mo}}{2,0}$
- 22) $\frac{\text{Pb}}{3,2 — 3,0} \frac{\text{Zn}}{2,7}$
- 23) $\frac{\text{Ti}}{2,7 — 2,3} \frac{\text{Ag}}{2,5} \frac{\text{Zn}}{2,4 — 1,9} \frac{\text{Cr}}{2,1} \frac{\text{Li}}{—} \frac{\text{Mn}}{—} \frac{\text{Ga}}{—} \frac{\text{Co}}{—} \frac{\text{Pb}}{—} \frac{\text{As}}{—} \frac{\text{Cu}}{1,8 — 1,0}$.

Аномальная составляющая геохимического поля (АСГП) проявлена в 17 группах (по первому ведущему элементу).

Первая и вторая группы классов (рис. 2, уч. I) характеризуются высокими значениями КА висмута, олова, серебра и бора, относящимися к ореолам коренного оруденения, и расположены в узле пересечения малой кольцевой структуры с субмеридиональным линейным разломом в центральной части крупной эллипсовидной структуры.

Третья и шестая группы классов (см. рис. 2, уч. II) относятся к ореолам коренного оруденения с высокими значениями КА молибдена, серебра и мышьяка. Размещение полей данной группы классов связано с рудопроявлением молибденита грейзенового типа, совмещенного с комплексными редкometалльными высокосеребристыми ассоциациями. В структурном отношении АСГП фиксирует центральную и периферические части купольной интрузивной структуры, наследующей ослабленную зону пересечения северо-восточного (поясного) направления с субмеридиональными разрывами.

Седьмая, девятнадцатая, двадцатая, двадцать первая и двадцать вторая группы классов (см. рис. 2, уч. III) располагаются в основном в центральной части кольцевой структуры и определяют ореол рудного поля олово-полиметаллического месторождения с высоким КА серебра, свинца, цинка, олова. В пределах кольцевой структуры расположение отдельных классов пространственно совпадает с различными уровнями эрозионного среза коренного оруденения, фиксируя наиболее эродированный участок IV появлением тринадцатого класса с аномальными КА олова. Менее эро-

дированный участок олово-полиметаллического оруденения расположен к северо-западу от кольцевой структуры (классы 19 и 20). Положение АСГП здесь довольно четко выявляет рудоконтролирующую значение северо-западных и субширотных фрагментов, дешифрирующихся на КС разрывных нарушений.

Пятая, восьмая, десятая группы классов могут быть отнесены к эманационным ореолам магматического этапа формирования редкometалльных интрузий лейкократовых гранитов ранне- и позднемелового возраста и характеризуются повышенными КА бора и марганца.

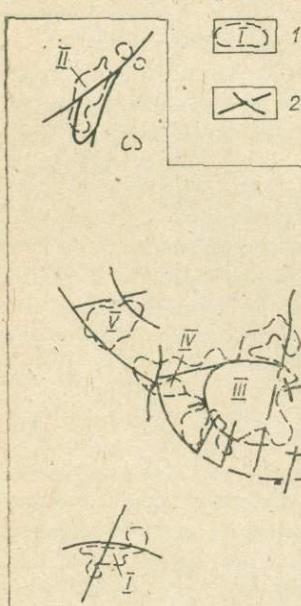


Рис. 2. Выявление рудоконтролирующей роли фрагментов разрывных нарушений, дешифрирующихся на КС, по положению участков АСГП.

1 — участки развития АСГП (I—V), отражающие формационно-генетические особенности процессов рудообразования; 2 — рудоконтролирующие фрагменты разрывных нарушений, дешифрирующиеся на КС.

Семнадцатая группа классов с цинковой АСГП трактуется авторами как проявление ореола субвулканической фации магматического процесса.

Седьмой класс АСГП с небольшим повышением КА молибдена фиксирует положение терригенно-осадочных блоков палеозойского фундамента вулканогенного пояса, испытавших метасоматическое воздействие в процессе формирования интрузивной структуры.

Многомерный анализ геохимического поля космогеологических объектов позволяет выявить площади, где аномальная составляющая подсказывает существование приразломных метасоматитов с высокими КА скандия, циркония, титана (классы 14, 15). Совмещение данных полей с геологическим субстратом предполагает связь развитых на данных площадях вулканогенных образований с глубинными источниками магматического расплава.

Анализ формул геохимических ассоциаций и их пространственное положение в пределах космогеологических структур выявляет аддитивность аномальных составляющих геохимического поля и их рудно-формационную принадлежность на фоне геохимической специализации (или на фоне нормального геохимического поля) отдельных космогеологических объектов. Значительная часть площади характеризуется группой фоновых классов. Все космогеологические объекты, выявленные в результате дешифрирования КС и комплексных наземных работ, коррелируются с ярко выраженным аномалиями геохимических ассоциаций, отчетливо отражающими формационно-генетические особенности процессов рудообразования. Несколько групп классов подчеркивают геохимическую специализацию покровных, вулканогенных, субвулканических и интрузивных образований и имеют значение для палеовулканических реконструкций территории.

Таким образом, новый метод анализа традиционного фактического материала литохимических съемок по потокам рассеяния может быть использован для геохимической интерпретации рудоносности геологических объектов, дешифрирующихся на КС структур, зон разломов, узлов их пересечения, структурно-вещественных комплексов. Возможность количественной оценки геохимического поля по результатам литохимической съемки по потокам рассеяния несет в себе потенциальные резервы для отыскания объективных зависимостей между аномалиями геохимического поля и определенными дешифровочными признаками на КС и АС.

ЛИТЕРАТУРА

- Ананченко А. Д. Геохимические поиски при групповой съемке в Пенжинском секторе Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений в северных районах Сибири. Якутск, 1979а, с. 63—66.
- Ананченко А. Д. Геохимические карты и их использование при поисках и прогнозе рудных полезных ископаемых.— В кн.: Геохимические карты и их использование при поисках рудных месторождений. Ч. II. Хабаровск, 1979б, с. 86—88.
- Евдокимова В. Н., Китаев Н. А. Обработка данных геохимических съемок на основе анализа рудных полей.— В кн.: Геохимические поиски рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке по вторичным ореолам рассеяния. Иркутск, 1973, с. 212—225.
- Поликарпочкин В. В. Стратегия геохимических поисков рудных месторождений.— Новосибирск, 1980, с. 21—28.
- Соловов А. П. Основы теории и практики металлометрических съемок.— Алма-Ата, 1959.— 266 с.
- Соловов А. П. Современное состояние и перспективы развития геохимических методов поисков рудных месторождений.— Вестн. МГУ. Сер. геол., 1979, № 2, с. 3—22.
- Сонин И. И., Коршунов В. А. Методика и результаты литохимических поисков по потокам рассеяния в условиях Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.— В кн.: Методика и техника геохимических поисков рудных месторождений. Фрунзе, 1975, с. 159—162.

П. В. КОВАЛЬ, В. М. ЯКИМОВ, В. И. КОВАЛЕНКО,
В. А. НАЙГЕБАУЭР, Р. И. ДУБОВ

ТRENД-АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РАННЕМЕЗОЗОЙСКИХ ГРАНИТОИДОВ МОНГОЛИИ

Сравнительный тренд-анализ, заключающийся в формализованном представлении геохимической или геологической информации в виде проекций трендов на карту-основу и ее сопоставлении с различными аспектами геологии выбранных объектов, предпринят как попытка количественного изучения геохимической зональности раннемезозойского ареала интрузивного магматизма западной части Монголо-Охотской внутриконтинентальной подвижной зоны. Рассматриваемый ареал является важнейшей редкометалльной провинцией МНР. Согласно В. И. Коваленко с соавторами [1975, 1981], известково-щелочные интрузии его внутренней области сменяются магматическими проявлениями повышенной щелочности периферической зоны. Представляя площадное распределение концентраций петрогенных элементов в совокупности отдельных интрузивных тел в виде непрерывной функции, мы, таким образом, рассматриваем вещественный состав магматических пород одного этапа как единое геохимическое поле. Концентрации химических элементов в гранитоидах раннемезозойского ареала аппроксимировались логарифмической параболой по методике, разработанной Р. И. Дубовым [1974]. Предположим, что нужно выделить из значений $C_h = C(x_h, y_h)$ все закономерные изменения поля концентраций, прослеживающиеся на расстоянии R_0 и более. Аппроксимируемую функцию обозначим C^* . Для каждой точки (x_h, y_h) выберем ближайшую к ней из тех, которые расположены на расстоянии не менее R_0 . Полученные пары обозначим $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$; n_c и n_p будут соответственно числа случаев, когда знаки разностей $C(x_i, y_i) - C^*(x_i, y_i)$ и $C(x_j, y_j) - C^*(x_j, y_j)$ совпадают или противоположны, а $n_{pc} = n_c + n_p$. Остающиеся отклонения значений $C_i = C(x_i, y_i)$ и $C_j = C(x_j, y_j)$ от функции C^* в точках (x_h, y_h) не содержат закономерной составляющей, так как полностью случайны, т. е. знаки указанных разностей должны быть взаимно не коррелированы. Некоррелированность знаков означает, что после любого знака первой разности вторая разность может быть как положительной, так и отрицательной, т. е. одинаковы математические ожидания долей случаев, входящих в n_c и n_p :

$$\text{или } M\left(\frac{n_c}{n_{pc}}\right) = M\left(\frac{n_p}{n_{pc}}\right)$$
$$M\left(\frac{n_c - n_p}{n_{pc}}\right) = 0.$$

Отсюда следует, что мы допустим в среднем наименьшую ошибку аппроксимации, если будем выбирать значения порядка логарифмической параболы (L) такими, чтобы величина $Z = \frac{n_c - n_p}{n_{pc}}$ была наиболее близкой нулю. Предшествующие расчету трендов операции включали сбор, оценку качества и отбраковку аналитического материала (356 силикатных анализов) и определение координат пунктов опробования на карте-основе [Картат..., 1979].

Топография аппроксимирующих поверхностей разных порядков петрогенных элементов и основные геологические выводы сравнительного тренд-анализа рассмотрены нами ранее [Коваль и др., 1980]. Здесь же остановимся еще на некоторых методических моментах, учет которых при региональных исследованиях в условиях неравномерного опробования может быть полезен как при построении поверхностей трендов, так и при интерпретации результатов.

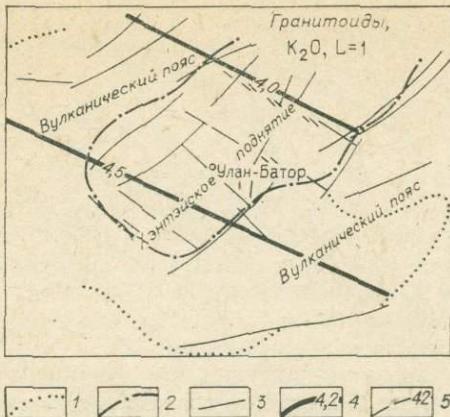


Рис. 1. Тренд 1-го порядка калия раннемезозойских гранитоидов Северо-Восточной Монголии.

Здесь и на рис. 2—7: 1 — граница ареала раннемезозойского магматизма; 2 — граница зон известково-щелочного магматизма (внутренняя) и магматизма повышенной щелочности (внешняя); 3 — основные разломы; 4 — изолинии концентраций и их значения, %; 5 — изолинии мощности земной коры и их значения, км (см. на рис. 2, по Ц. Тудэв, И. Балбар 1980).

ные и локальные составляющие геохимического поля. Так, направление наибольших градиентов для большинства петрогенных элементов близко к направлению продольной оси Хэнтэй-Даурского мегасвода [Металлогенический анализ..., 1977], грубо согласуясь с направлением, нормальным к границе Азиатского континента («Монголо-Охотское направление») (рис. 1). В глубь континента возрастают кремнеземистость и общая щелочность гранитоидов, снижается их основность. Этот вывод подтверждается сопоставлением средних составов мезозойских гранитоидов Монголии, Забайкалья и Северо-Востока Азии [Канищев, Менакер, 1971; Вистелиус и др., 1974; Якимов и др., 1978; Коваль и др., 1981], а также результатами тренд-анализа, выполненного А. Б. Вистелиусом с соавторами [1969]. Такая же закономерность отмечена для позднемезозойского магматизма окраин континентов [Miyashiro, 1975].

Обращает на себя внимание иной по сравнению с другими петрогенными элементами характер тренда натрия. По теоретическим выкладкам [Коржинский, 1972] и геохимическим расчетам [Ронов, Ярошевский, 1976] связь калия и кремния с ювелирным источником наиболее вероятна. В отличие от калия и кремния, содержания которых возрастают в глубь континента в направлении, близком к оси Хэнтэй-Даурского мегасвода, направление максимальной изменчивости содержаний натрия занимает секущее положение относительно этой оси (рис. 2). Отмеченная ориентировка изоконцентрат натрия хорошо согласуется с мощностью «гранитного» слоя земной коры и в первом приближении с положением разделя Мохоровичича [Степанов, Волхонин, 1969; Тудэв, Балбар, 1980]. Такая связь дает основание предполагать либо определяющую роль корового источника натрия, либо изменение натрий-калиевого отношения в ювелирном источнике по мере нарастания мощности земной коры, либо совместное влияние обоих факторов. Предложенное нами ранее [Коваль и др., 1980] альтернативное объяснение специфики трендов натрия, обусловленной влиянием близкого по возрасту габброидного магматизма, по-видимому, менее вероятно.

Следует особо подчеркнуть, что в силу относительно небольших градиентов поля и сложности структуры магматического ареала глобальная составляющая поля с очевидностью выделяется лишь при обработке

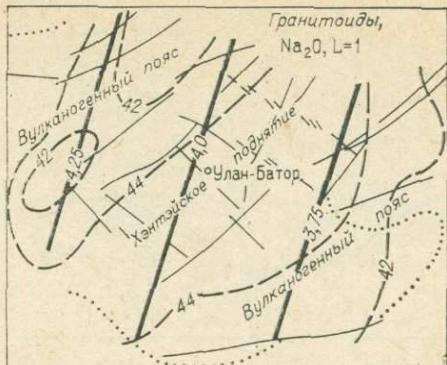


Рис. 2. Тренд 1-го порядка натрия раннемезозойских гранитоидов Северо-Восточной Монголии.

Последовательная аппроксимация при возраставшем порядке параболы позволяет оценить относительно глобальные, региональные и локальные составляющие геохимического поля. Аппроксимирующая

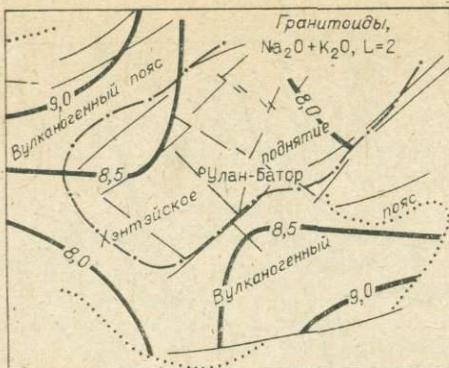


Рис. 3. Тренд 2-го порядка суммы натрия и калия раннемезозойских гранитоидов Северо-Восточной Монголии.

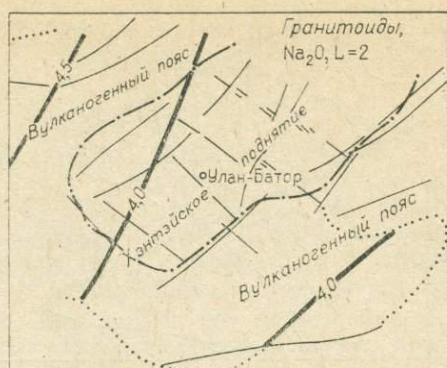


Рис. 4. Тренд 2-го порядка натрия раннемезозойских гранитоидов Северо-Восточной Монголии.

аналитических данных по целым регионам или отдельным крупным областям.

Аппроксимирующие поверхности второго порядка наряду с глобальной закономерностью изменения поля концентраций достаточно определенно отражают региональную составляющую поля. Эта важнейшая особенность поля концентраций хорошо выражена также в тренд-поверхностях более высоких порядков, грубо симметричных относительно Хэнтэй-Даурского мегасвода. В этом отношении наиболее показательны тренды щелочности гранитоидов (рис. 3).

Тренды поверхности второго порядка отчетливо указывают и на асимметрию зональности щелочности. Так, при сравнении трендов натрия и калия с достаточной очевидностью выявляется «натровая» специфика щелочности северо-западного крыла обрамления мегасвода и «калиевая» — юго-восточного (рис. 4, 5).

Аппроксимирующие поверхности третьего и более высоких порядков осложнены элементами, в которых отчетливо проявляется влияние региональных структур и других факторов. Направление изоконцентрат, возрастание градиентов концентраций, перегибы поверхностей часто согласуются с зонами глубинных разломов и тектонических «порогов». В первую очередь это Онон-Гобийская и Баянгол-Селенгинская ветви Монголо-Охотского линеамента, зоны Орхонского, Улан-Баторского, Бархинского «порогов» (рис. 6, 7). В этой особенности трендов отражены элементы блокового строения ареала магматизма, выявленного ранее при анализе мезозойских интрузивных ассоциаций Монголии [Коваль, Цыпуков, 1976; Коваль, 1979].

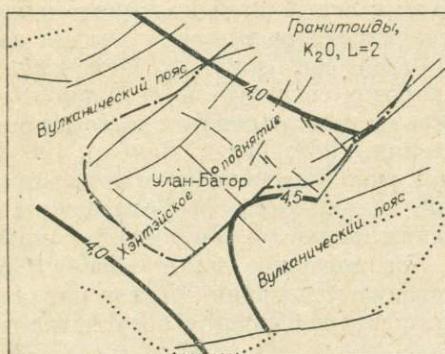


Рис. 5. Тренд 2-го порядка калия раннемезозойских гранитоидов Северо-Восточной Монголии.

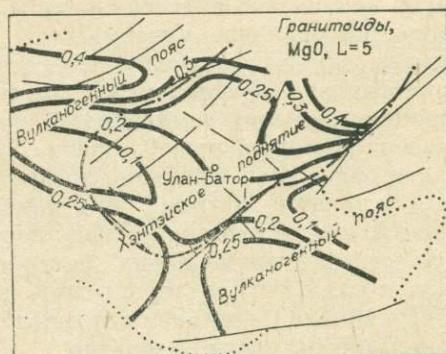
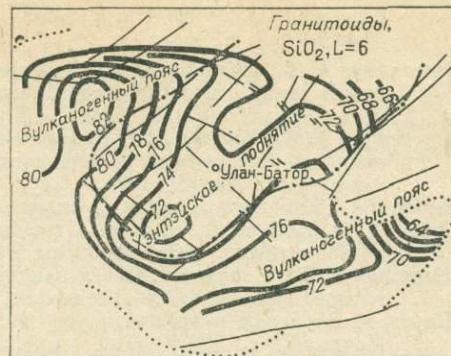


Рис. 6. Тренд 5-го порядка магния раннемезозойских гранитоидов Северо-Восточной Монголии.

Рис. 7. Тренд 6-го порядка кремнезема раннемезозойских гранитоидов Северо-Восточной Монголии.



Важное следствие вытекает из анализа связи радиуса автокорреляции (R_0) и критерия оптимальности трендов (Z). Опытная оценка зависимости Z от R_0 при последовательном переборе R_0 (15, 30 и 120 км) показала, что с увеличением радиуса автокорреляции оптимальные значения Z достигаются при более низких порядках. Эта закономерность для каждого элемента носит индивидуальный характер. Увеличение радиуса автокорреляции способствует выявлению более общих, региональных особенностей строения поля, т. е., чем меньший «вес» в распределении концентраций данного элемента имеют локальные составляющие, тем ниже будет порядок оптимальной аппроксимирующей параболы по оценке критерием Z .

Выбор R_0 при построении трендов так же является важным моментом. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что тренды концентраций химических элементов, представленные логарифмической параболой оптимального порядка, автоматически выбранного по критерию Z , наилучшим образом согласуются с геологическим строением региона в случае принятия радиуса автокорреляции близким к масштабу соответствующей геологической основы. Так, при радиусе автокорреляции, соответствующем масштабу карты основы (15 км) данного региона, в качестве оптимальных для SiO_2 , CaO , MgO и др. могут рассматриваться логарифмические параболы 4—6-го порядков и 2-го порядка — для общей щелочности ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$).

При региональных исследованиях равномерность и плотность опробования зависят не только от степени изученности всего региона и отдельных его участков, но и в значительной мере от размещения на площади объектов исследования. В связи с конечными размерами исследуемого поля концентраций и «окнами» в опробовании, при малых R_0 с возрастанием порядка аппроксимирующей функции все более начинает проявляться краевой эффект [Девис, 1977]. В таких случаях на планах аппроксимирующих функций, представленных параболой высокого порядка, могут появляться нереальные значения концентраций. Нац опыт показал, что оценка оптимальности трендов при подобного рода исследованиях должна складываться из учета критерия Z , краевого эффекта и особенностей структуры изучаемого поля, а также соответствия трендов геологическому строению региона.

Опыт применения тренд-анализа при изучении региональных ареалов интрузивных пород свидетельствует о его широких, еще недостаточно используемых возможностях. Он позволяет проводить независимую формализованную оценку различных моделей региональной магматической зональности. Особый интерес представляет анализ поверхностей трендов разных порядков, построенных при разных радиусах автокорреляции, для выявления закономерных составляющих поля концентраций, отображающих разную роль глобальных (ювенильных) и региональных (коровых) факторов в геохимии элементов.

Интересная информация может быть получена при построении трендов различных геохимических отношений и карт избыточных полей (разностей трендов различных порядков). Представляется перспективным применение тренд-анализа в масштабе отдельных рудных районов, узлов и полей в целях изучения структуры геохимических полей и прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

- Вистелиус А. Б., Аралина А. И., Бурьянова И. З. Основные закономерности распределения калия в послеюрских гранитоидах Северо-Востока Азии и примыкающей части Тихого океана.— Докл. АН СССР, 1969, т. 184, № 2, с. 441—444.
- Вистелиус А. Б., Иванов Д. Н., Романова М. А. Региональный тренд состава мезозойских гранитоидов и локализация оловоносных областей Северо-Восточной Азии.— Л.: Наука, 1974.— 34 с.
- Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных.— М.: Мир, 1977.— 571 с.
- Дубов Р. И. Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений.— Новосибирск: Наука, 1974.— 275 с.
- Канищев А. Д., Менакер Г. И. Химическое строение земной коры Центрального и Восточного Забайкалья.— Геохимия, 1971, № 1, с. 3—17.
- Карта мезозойской и кайнозойской тектоники Монгольской Народной Республики. Масштаб 1 : 1 500 000/Гл. ред. А. Л. Яншин.— М.: ГУКГ, 1979.
- Коваленко В. И., Коваль П. В., Антипов В. С., Якимов В. М. Проблемы потенциальной рудоносности магматических пород зон тектономагматической активизации (на примере мезозоя западной части Монголо-Охотского пояса).— В кн.: Петрология и петрохимия рудоносных магматических формаций. М.: Наука, 1981, с. 68—132.
- Коваленко В. И., Кузьмин М. И., Антипов В. С., Коваль П. В. Зональность мезозойских магматических и метасоматических пород западной части Монголо-Охотского пояса и некоторые вопросы их генезиса.— В кн.: Геохимия и петрология метасоматизма. Новосибирск: Наука, 1975, с. 103—173.
- Коваль П. В. Геохимические особенности мезозойских магматических ассоциаций Монголии.— М.: Наука, 1979, с. 168—178.
- Коваль П. В., Цышков Ю. П. Новые данные по магматизму Хэнтэйского поднятия (МНР).— В кн.: Ежегодник-1974 СибГЕОХИ. Новосибирск: Наука, 1976, с. 108—112.
- Коваль П. В., Якимов В. М., Коваленко В. И., Найгебауэр В. А. Очерк петрохимии мезозойских интрузий Монголии.— В кн.: Петрология и петрохимия рудоносных магматических формаций. М.: Наука, 1981, с. 133—159.
- Коваль П. В., Якимов В. М., Коваленко В. И. и др. Петрохимия раннемезозойских интрузий Монголии.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1980, № 8, с. 21—34.
- Коржинский Д. С. Потоки трансмагматических растворов и процессы гранитизации.— В кн.: Магматизм, формации кристаллических пород глубины земли. Ч. 1. М.: Наука, 1972, с. 87—99.
- Металлогенический анализ в областях активизации/Отв. ред. Е. Т. Шаталов.— М.: Наука, 1977.— 176 с.
- Ронов А. Б., Ярошевский А. А. Новая модель химического строения земной коры.— Геохимия, 1976, № 12, с. 1763—1795.
- Степанов П. П., Волхонин В. С. Современная структура и глубинное строение земной коры Монголии по геофизическим данным.— Сов. геология, 1969, № 5, с. 47—64.
- Якимов В. М., Коваль П. В., Коваленко В. И. Распространенность, средний химический состав и тренды петрогенных элементов мезозойских интрузивных пород МНР.— Докл. АН СССР, 1978, т. 243, № 3, с. 746—749.
- Miyashiro A. Volcanic rock series and tectonizing setting.— Ann. Rev. Earth and Planet., 1975, v. 3, p. 251—269.
- Түдэв П., Балбар И. Гравитаций ба соронзон орны региональ гурван минимум.— Хайгуулчин, 1980, № 4, х. 9—16 (на монг. яз.).

В. Н. БОНДАРЕНКО, Л. А. ВЕРХОВСКАЯ, А. М. РОНИНА

ВЫДЕЛЕНИЕ АССОЦИАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ-ИНДИКАТОРОВ В ГЕОХИМИЧЕСКОМ ПОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Зональное распределение химических элементов в окорудном пространстве является информативной характеристикой, которой можно воспользоваться при оценке аномалий. Для оценки перспективности аномалии необходимо выяснить два основных вопроса: какие ассоциации элементов образуют аномальные зоны в исследуемом пространстве и какой характер пространственной закономерности в поведении содержаний элементов каждой такой ассоциации.

Первый вопрос связан с понятием комплексности окорудного ореола. Причем, по современным представлениям, рудная зона характеризу-

ется аномальностью типоморфного комплекса элементов, зависящего от типа оруденения. Ассоциации же аномальных элементов в верхнерудных и нижнерудных зонах ореола включают в себя элементы-индикаторы, характеризующие соответственно над- и подрудные толщи. Самые общие закономерности смены элементов, образующих эпицентры аномальности вдоль простирания рудных зон, сведены в ряд зональности [Овчинников, Григорян, 1970].

На второй вопрос, касающийся пространственной закономерности распределения содержаний элементов в околоврудном ореоле, можно найти принципиальные ответы, анализируя аналитические решения прямых задач геохимии. Они приведены в фундаментальных работах Д. С. Коржинского [1969] и В. С. Голубева, А. А. Гарянца [1968], давших теоретический анализ физико-химической природы процессов минералообразования соответственно с термодинамической и кинетической точек зрения. Результаты решения прямых задач геохимии можно обобщить, так как пространственное распределение вещества, участвовавшего в гидротермальном процессе, всегда описывается функциями из класса экспонент:

$$C_{\text{ан}}(z) = C_0 \exp \{-\alpha(z - z_0)\}$$

или

$$C_{\text{ан}}(z) = C_0 \exp \left\{ -\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma^2} \right\},$$

где z_0 — координата эпицентра аномалии; C_0 , α , σ — параметры аналитических кривых.

Следует подчеркнуть конгруэнтность экспоненциального пространственного распределения вещества, несмотря на огромное многообразие исходных составов гидротерм, условий протекания процессов минералообразования (и, в частности, рудообразования). А. Б. Вистелиус [1963] отмечает экспоненциальное распределение вещества в пространстве как «сигнал» о возможной близости руды, так как такая закономерность с необходимостью является «следом» энергетических процессов, обусловивших ее образование. Кроме того, существуют сведения, что надрудные ореолы месторождений осадочного и магматического генезисов [Сафонов, 1971], а также вторичные ореолы [Соловов, 1963; Дубов, 1974] описываются экспоненциальными функциями.

Выделение интересующих нас закономерностей из экспериментального материала сводится так или иначе к вычислению некоторой функции Q от экспериментальных данных $\xi(z)$:

$$\phi = Q[\xi(z)].$$

Какой же класс функций Q оптimalен для решения нашей задачи? Если мы сформулировали задачу как необходимость выделения пространственных закономерностей в геохимическом поле, то для ее решения однозначно находим в арсенале теории случайных функций аппарат фильтрации. Критерий для определения параметров фильтрации при выделении закономерностей должен вытекать из формулировки задачи, позволяющей назвать неинформативными для решения поисковой задачи все составляющие измеренного геохимического поля, которые не зависят от координат. Эти составляющие могут быть обусловлены микронеоднородностями измеряемого поля, а также в обязательном порядке включают в себя погрешности отбора и обработки проб, анализа содержаний химических элементов в пробах. При этом следует заметить, что погрешность спектрального приближенно-количественного анализа, результатами которого в основном пользуются при геохимических исследованиях, слишком велики, чтобы ими пренебрегать. Итак, критерий фильтрации при выделении закономерностей геохимического поля математическими методами заключается в следующем — отфильтровываемая (шумовая, неинформативная) высокочастотная составляющая изотропна.

Методы фильтрации могут быть самые различные: линейная фильтрация (сглаживание), нелинейная фильтрация, любые аналитические аппроксимации детерминированной составляющей (полиномиальные тренды и др.). Основная идея заключается в том, что подбор параметров фильтрации или аппроксимации должен удовлетворить сформулированный выше критерий.

При обработке результатов спектрального анализа геохимических проб наиболее проста из приемлемых математических моделей геохимического поля следующая мультиплекативная модель: $\xi(z) = C(z) \cdot \psi(z)$, где $\xi(z)$ — результаты измерений; $C(z)$ — детерминированная составляющая геохимического поля, представляющая собой наложение аномалий $C_{\text{ан}}(z)$ на сингенетичное поле рассеяния $C_{\phi}(z)$; $\psi(z)$ — шумовая составляющая, обусловленная ошибками спектрального анализа и природной дисперсией геохимического поля.

В работе Л. А. Верховской и Е. П. Сорокиной [1981, разд. IV—3] показано, что выделение детерминированной составляющей в мультиплекативной модели может проводиться методами линейной фильтрации, причем изотропность постулируется для составляющей $\hat{\psi}(z)$, вычисляемой по следующей формуле в процессе получения оценки $\hat{C}(z)$:

$$\hat{\psi}(z) = 1 + \frac{\xi(z) - \hat{C}(z)}{\hat{C}(z)}.$$

Изотропность отфильтровываемой составляющей устанавливается по результатам проверки двух статистических гипотез: равенство математического ожидания и дисперсии константам и согласие автокорреляционной функции виду δ -функции:

- 1) $M[\hat{\psi}(z)] = 1, D[\hat{\psi}(z)] \approx \varepsilon_{\text{лаб}}^2;$
- 2) $M[(\hat{\psi}(z) - 1)(\hat{\psi}(z + \tau) - 1)] = \delta(\tau),$

где $\varepsilon_{\text{лаб}}$ — погрешность результатов анализа спектральной лаборатории.

В алгоритме, реализованном на ЭВМ, параметр сглаживания меняется от минимального, постепенно увеличивается, пока не окажется справедливой гипотеза об изотропности остаточного поля. Фильтрация ведется для каждого элемента с учетом пространственной привязки проб (вдоль профилей или скважин по одному алгоритму и на площади при произвольной сети опробования — по другому).

Анализ конкордантности детерминированных составляющих полей распределения концентраций различных элементов можно проводить различными методами многомерной статистики. Наиболее приемлемым представляется метод главных компонент по следующим причинам. Метод выделяет ассоциации элементов, имеющих наибольшие дисперсии и наиболее значимые коэффициенты корреляции между собой. Другими словами, из всей совокупности изучаемых элементов будут выделены те, которые имеют в исследуемом поле наиболее контрастные синхронные аномалии. С геохимических позиций это очень важный факт, так как известно, что дисперсии содержаний элементов в зонах минерализации много выше, чем в сингенетическом поле рассеяния, не говоря уже о таковых в околоврудных ореолах. Элементы, индифферентные к прошедшим процессам переработки пород, имеют малые дисперсии сингенетического поля рассеяния и не войдут в главные компоненты.

Для того чтобы можно было использовать полезную информацию о дисперсиях различных элементов, предложено [Применение..., 1975] нормировать матрицу рассеяния делением на соответствующие средние значения. Это эквивалентно вычислению оценки матрицы вариаций

$$V = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1m} \\ V_{21} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & V_{mm} \end{pmatrix},$$

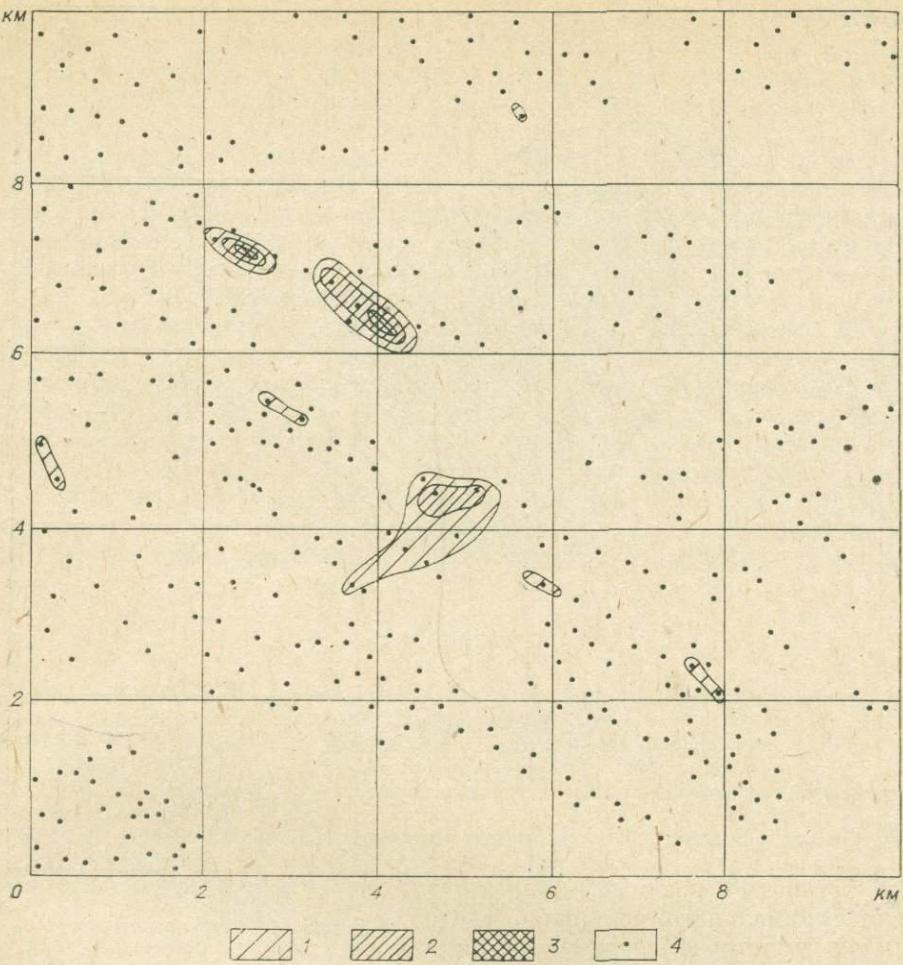


Рис. 1. Пространственное распределение значений первой главной компоненты K , вычисленной по матрице вариаций исходных данных.

1—3 — значения: 1 — от 0 до 10, 2 — от 10 до 50, 3 — выше 50; 4 — точки опробования.

где $V_{ij} = \frac{k_{ij}}{\mu_i \mu_j}$, k_{jj} — ковариационный момент между i -м и j -м признаками;

μ_i — математическое ожидание i -го признака; m — число признаков (исследуемых элементов).

Доказанные ранее авторами свойства оценок коэффициентов вариации и парной корреляции, вычисленных по неоднородным выборкам, позволяют гарантировать следующее. Главные компоненты, вычисленные по матрице вариаций, выделяют несколько ассоциаций с дискордантными между собой аномалиями в пространстве. Это дает возможность анализировать зональность изучаемой территории. Каждая главная компонента из нескольких первых дает оценку ассоциации наиболее контрастных конкордантных и антикордантных элементов, среди которых обычно присутствует типоморфный комплекс элементов. Последний, следует подчеркнуть, выделяется методом автоматически, без привлечения какой-либо априорной информации.

Способы интерпретации ассоциаций, выделяемых методом главных компонент, уже достаточно известны (например, Nairis [1970]). Представляется необходимым в настоящее время продемонстрировать полезность фильтрации больших ошибок спектрального анализа.

На рис. 1, 2 даны результаты геохимических исследований участка $10 \text{ км} \times 10 \text{ км}$, проводимых по выходам горных пород (в масштабе

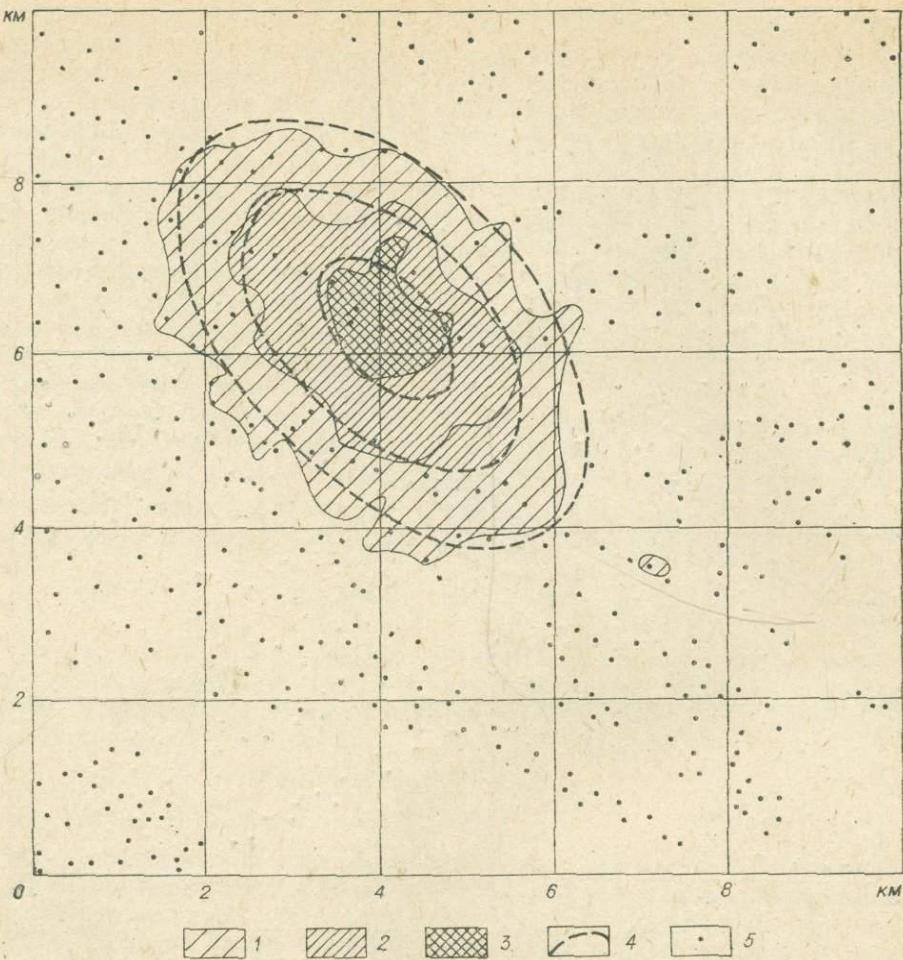


Рис. 2. Пространственное распределение значений первой главной компоненты K_0 , вычисленной по матрице вариаций сглаженных содержаний химических элементов, 1—3 — значения: 1 — от 1 до 5, 2 — от 5 до 9, 3 — выше 9; 4 — аппроксимация экспоненциальной функцией типа Гаусса; 5 — точки опробования.

1 : 50 000 *). В расчетах использованы анализы 411 проб на 23 элемента (Sn, Pb, Zn, Ag, Mo, W, Co, Bi, Be, Cu, Ni, Ba, V, Cr, Ce, La, Y, Yb, Zr, Sc, B, As, Sb).

На рис. 1 демонстрируется распределение в пространстве значений первой главной компоненты, вычисленной по матрице вариаций исходных данных. Эта компонента выделила следующую ассоциацию контрастно аномальных элементов:

$$K = 0,71 \frac{\text{As} - \overline{\text{As}}}{\overline{\text{As}}} + 0,57 \frac{\text{Ag} - \overline{\text{Ag}}}{\overline{\text{Ag}}} + 0,42 \frac{\text{Sb} - \overline{\text{Sb}}}{\overline{\text{Sb}}}.$$

Аналогичные вычисления по данным, очищенным от неинформативной изотропной составляющей геохимического поля посредством линейной фильтрации, приведены на рис. 2. В этом случае первая главная компонента существенно уточнила ассоциацию, позволив предполагать не только высокий эрозионный срез возможного оруденения, но и его редкометалльный тип:

$$K_0 = 0,61 \frac{\text{As} - \overline{\text{As}}}{\overline{\text{As}}} + 0,57 \frac{\text{Ag} - \overline{\text{Ag}}}{\overline{\text{Ag}}} + 0,35 \frac{\text{Sb} - \overline{\text{Sb}}}{\overline{\text{Sb}}} + \\ + 0,20 \frac{\text{Bi} - \overline{\text{Bi}}}{\overline{\text{Bi}}} + 0,10 \frac{\text{Be} - \overline{\text{Be}}}{\overline{\text{Be}}}.$$

* Материалы любезно предоставлены Т. А. Ивановой и Г. М. Мейтумом.

Результаты картирования значений этой компоненты принципиально отличаются от таковых на рис. 1. Если в исходных данных оказалась заметной синхронность трёх элементов только в сильно аномальных пробах, то после фильтрации конкордантность этого комплекса (As, Ag, Sb) вместе с Bi и Be допускает экспоненциальную аппроксимацию аномалии, как показано на рис. 2. Последнее позволяет говорить о проявлении на площади аномалии некоторых физико-химических процессов переработки исходных пород. К сожалению, этот необходимый признак гидротермальной переработки еще достаточен для утверждения наличия руды. Но перспективность этой аномалии для дальнейших исследований бесспорна.

Приведенный пример математической обработки реального материала лишь подтверждает полезность фильтрации геохимических данных. Принципиальная необходимость фильтрации огромных ошибок спектрального приближенно-количественного анализа перед обработкой материалов математическими методами методически ясна априори. Исследователи, обрабатывающие, геохимические данные вручную, всегда проводят операцию сглаживания (если не в явном виде, то на интуитивном уровне), объединяя «аналогичные» и не учитывая «ураганные» явления. Обработка же геохимических материалов с помощью формальных алгоритмов на ЭВМ требует обязательной предварительной фильтрации исходных данных.

ЛИТЕРАТУРА

- Верховская Л. А., Сорокина Е. П. Математическое моделирование геохимического поля в поисковых целях.— М.: Недра, 1981.— 186 с.
- Вистелиус А. Б. Фазовая дифференциация палеозойских отложений Среднего Поволжья и Заволжья.— Л.—М.: Изд-во АН СССР, 1963.— 203 с.
- Голубев В. С., Гарифянц А. А. Гетерогенные процессы геохимической миграции.— М.: Недра, 1968.— 191 с.
- Дубов Р. И. Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений.— Новосибирск: Наука, 1974.— 274 с.
- Коржинский Д. С. Теория метасоматической зональности.— М.: Наука, 1969.— 111 с.
- Овчинников Л. Н., Григорян С. В. Закономерности состава и строения первичных геохимических ореолов сульфидных месторождений.— В кн.: Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Ч. 1. Иркутск, 1970, с. 3—36.
- Применение метода главных компонент для характеристики геохимических аномалий/Бондаренко В. Н., Верховская Л. А., Сорокина Е. П. и др.— Сов. геология, 1975, № 8, с. 98—106.
- Сафонов Н. Н. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений.— Л.: Недра, 1971.— 216 с.
- Соловов А. П. Классификация ореолов рассеяния рудных месторождений.— В кн.: Глубинные поиски рудных месторождений. М.: Госгеолтехиздат, 1963, с. 21—34.
- Nairis B. Proceedings of III International Geochemical Exploration Symposium.— Toronto, 1970. (Перевод в кн.: Геохимические поиски. М.: Мир, 1973, с. 196—214).

М. Д. КАРГЕР, С. А. САНДОМИРСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНАЛЬНОСТИ ПЕРВИЧНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ НА ЭВМ

В результате многолетних геохимических исследований, проводившихся разными авторами, выяснено, что геохимический облик первичных ореолов и их геометрические характеристики тесно взаимосвязаны. В частности, известно, что размеры первичного ореола и размах его зональности определяются размерами рудного тела. Благодаря этому часто удается из геохимических данных извлечь информацию о масштабе оруденения, используя для этого, например, «коэффициент интенсивности оруденения», предложенный С. В. Григоряном. В то же время [Григорян, 1974; Соловов, 1978; и др.] генетически однотипные, но отличающиеся по размерам пер-

вичные геохимические ореолы имеют сходную зональность, которую удастся уравнять их взаимным растяжением — сжатием. В результате этой процедуры может быть установлено эмпирическое правило, связывающее коэффициент зональности и внутриореольные расстояния, нормированные длиной соответствующего ореола.

Опыт изучения закономерностей строения первичных геохимических ореолов подводит нас к обобщенной модели геохимической изменчивости первичного ореола, согласно которой она складывается из трех независимых составляющих, рассматриваемых как функции от геохимических признаков: 1) «зональной» составляющей, обусловленной собственно осевой геохимической зональностью; 2) «масштабной» составляющей, отражающей масштаб рудного тела, например его размеры; 3) «шумовой» составляющей, обусловленной индивидуальными особенностями конкретного ореола.

Сечение геохимического ореола можно представить точкой в многомерном пространстве, по координатным осям которого отложены геохимические признаки. Совокупность сечений первичных ореолов выглядит в этом пространстве как облако точек, многомерная структура которого отражает свойства геохимической изменчивости ореолов. Для описания структуры этого облака достаточно системы трех координат, соответствующих независимым составляющим геохимической изменчивости. Для удобства дальнейшего изложения обозначим зональную, масштабную и шумовую составляющие соответственно u , g и z .

Эта модель удобна при статистическом анализе данных об ореолах как для прогноза геометрических характеристик рудных тел, так и для решения вопросов генезиса месторождений. Далее будем говорить только о решении первой задачи (в силу ее большей актуальности), сформулированной так: для крутопадающих рудных тел, имеющих в поперечном разрезе существенно вытянутую форму, по единственному сечению ореола количественно определять, во-первых, его расстояние до некоторого начала отсчета в рудном теле, во-вторых — длину рудного тела в исследуемом разрезе. Такая постановка созвучна задаче регрессии внутриореольных расстояний (расстояния вдоль оси ореола) и длин рудных тел на функции u и g соответственно.

Чтобы выбрать подходящую регрессионную модель, целесообразно обратиться к результатам теоретического физико-математического анализа процессов формирования. Естественная модель рудообразования — фильтрация рудоносного раствора в изотропной среде с реакциями осаждения — кристаллизации I порядка. Такая модель рассматривалась Р. И. Дубовым [1974], В. С. Голубевым, В. Н. Шараповым [1974] и др. Кроме полезности в задаче регрессии она объясняет многие детали строения первичных ореолов.

Если рассматриваемые сечения ореола не слишком удалены от интервала оруденения, то концентрационный профиль рудного минерала, осажденного в процессе фильтрации, спрямляется в полулогарифмических координатах:

$$\ln C_1 = \text{const}_1 - \text{const}_2 \cdot k \cdot l,$$

где l — расстояние точки с концентрацией C_1 до точки максимума концентрации в рудном теле. В нестационарном профиле точка максимума является естественным началом отсчета внутриореольных расстояний. Интервал оруденения в этой модели допустимо задавать бортовым содержанием. Деление внутриореольных расстояний на длину L интервала оруденения, уравнивающее облики геохимической зональности рудных тел разной длины, эквивалентно увеличению скорости реакции осаждения k в L раз. Отсюда следует, что в фильтрационной модели, во-первых, нормировка внутриореольных расстояний длиной рудного тела в контуре бортовых содержаний является способом стандартизации геометрии ореола; во-вторых, линейность регрессионных соотношений достигается в том случае, если в них фигурируют, с одной стороны, длины рудных тел и

нормирование расстояния, а с другой — логарифмы геохимических показателей, имеющих размерность концентрации.

К сожалению, существующий аппарат регрессионного анализа в рассматриваемой задаче неприменим: во-первых, из-за наличия ошибок в регрессорах и, во-вторых (что наиболее важно), потому что число сечений хорошо изученных эталонных ореолов обычно мало и может быть даже меньше числа признаков. Поэтому здесь целесообразен алгоритм последовательного увеличения числа регрессоров. В примененном нами алгоритме, близком по своей идее алгоритму пошаговой циклической регрессии Р. И. Дубова

[Дубов и др., 1977], на любом шаге строится регрессия только на две переменные, одна из которых является исходным признаком, а другая — линейной комбинацией признаков, рассмотренных на предыдущих шагах.

Алгоритм COGEVAR (the Components of the Geochemical Variability) — составляющие геохимической изменчивости — реализован в виде программы на языке Фортран-IV для ЕС ЭВМ. Программа обрабатывает данные по сечениям ореолов эталонных рудных тел и в результате выдает два уравнения регрессии: $L = \psi(g)$ и $l^* = l/L = \varphi(u)$, где L — длины рудных тел, а l^* — нормированные расстояния сечений ореолов до центров рудных тел. Для получения расстояния от исследуемого сечения до центра рудного тела в метрах достаточно перемножить значения L и l^* , вычисленные на этом сечении. Блок-схема алгоритма изображена на рис. 1. Одним из достоинств этого алгоритма является возможность его реализации ручным способом.

Предлагаемая методика опробована на двух месторождениях с круто-падающими жилообразными рудными телами. Вся геолого-геохимическая документация по этим объектам любезно предоставлена Г. Я. Абрамсоном. На одном месторождении стояла задача оконтуривания рудных тел, на другом — требовалось разработать критерии оценки положения аномалий относительно рудных тел на основании изучения зональности первичных ореолов эталонной рудной залежи.

Первое месторождение относится к золото-арсенопиритовой формации. В рудных и околорудном пространствах месторождения приближенно-количественным спектральным анализом обнаружены в аномальных концентрациях Pb, Zn, Ba, W, Ni, Co, Mn, Bi, Mo, Y и другие элементы. В контуре низкнеаномальных содержаний первичные ореолы превышаютоперечные размеры рудных тел на 30—50 м. Антимонит, галенит и аргентит (соответственно Ag, Pb, Sb в ореолах) тяготеют к верхним частям рудных тел, арсенопирит и халькопирит (As, Cu) — к нижним. Co, Ni и Mn имеют ореолы выноса на фоне увеличения их продуктивностей по падению рудных тел. Зональность Mo, Sn, Bi, W — более сложна, так как на месторождении имеются проявления редкометалльной минерализации, для которой эти элементы типоморфны. Надежные элементы-индикаторы золотого оруденения располагаются в ряду Ag — Pb — Sb — Cu — Au — As.

Выделение зональной составляющей Выделение масштабной составляющей

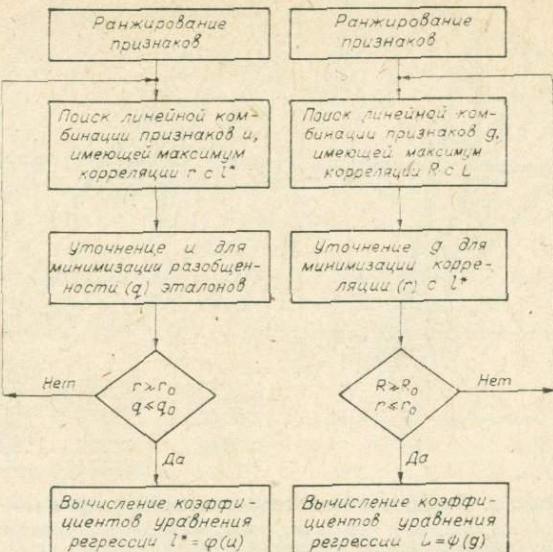


Рис. 1. Блок-схема алгоритма.

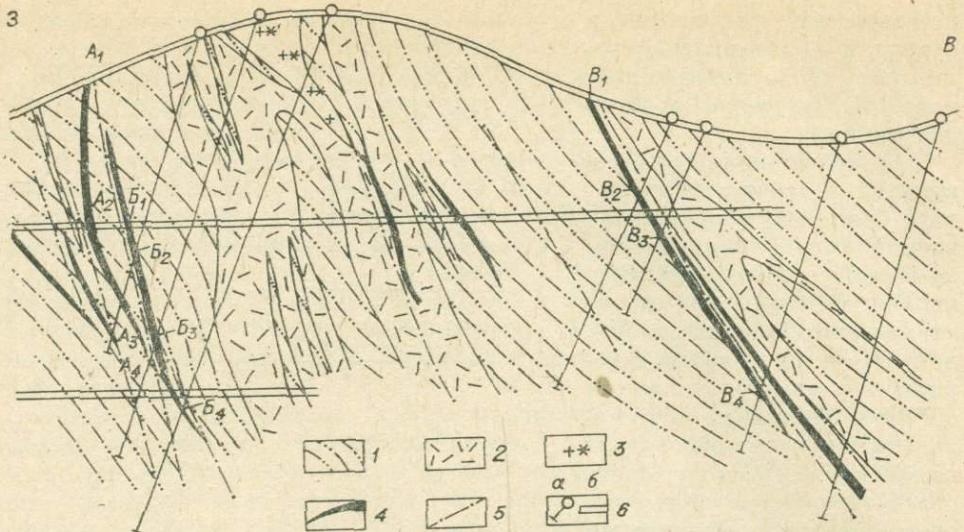


Рис. 2. Схематический геологический разрез месторождения (по Г. Я. Абрамсону). 1 — алевролиты и песчаники позднетриасового возраста; 2 — дайки и субвулканические тела липаритового состава; 3 — граносиениты; 4 — рудные тела; 5 — разрывные нарушения; 6 — скважины (а) и подземные горные выработки (б). А, А₂ и т. д.— сечения эталонных рудных тел.

На рис. 2 показан разрез через эталонные рудные тела. В качестве начала отсчета для измерения l выбирались точки, расположенные на равных расстояниях от верхних и нижних выклинилок рудных тел. Положение выклинилок определялось интерполяцией между выработками и по среднему углу выклинивания. Выбор геометрического центра в качестве начала отсчета обусловлен примерной симметричностью концентрационного профиля золота. Каждое сечение охарактеризовано значениями удельных продуктивностей 12 химических элементов.

Функции u и g и соответствующие уравнения регрессии имеют вид:

$$u = 0,89Ag + 0,16Bi + 0,14Mo + 0,12Mn - 0,37W - 0,29Cu - 0,05Co;$$

$$g = 0,67As + 0,11Mn + 0,08Ni + 0,08Co + 0,08Ag + 0,04Mo +$$

$$+ 0,03Pb - 0,16W - 0,05Bi;$$

$$l^* = 0,267u + 0,759; \quad L = -269g + 2.$$

В выражениях для u и g здесь и в дальнейшем символами химических элементов обозначены логарифмы их удельных производительностей.

Нетрудно заметить, что графики изменения u (рис. 3, а) образуют семейство хаотически переплетенных ломанных кривых, вытянутых вдоль линий регрессии. Это свидетельствует о том, что в комбинации u удалось исключить индивидуальные особенности рудных тел, связанные с их размерами. На графике изменения g (см. рис. 3, б), наоборот, отмечаются разобщенность групп точек, относящихся к разным рудным телам, и практическое отсутствие зональности значений g в отдельных рудных телах.

Проверка полученных уравнений проводится на семи разрезах через рудные тела того же месторождения. На шести разрезах имелось по два сечения, на одном — три. Проверка показала, что прогнозируемое положение нижних кромок рудных тел хорошо согласуется с фактическими данными. Средняя погрешность оценки положения нижней кромки составила 3 м. Значит, систематической погрешности практически нет и предлагаемая методика верно определяет внутриореольные расстояния и длины рудных тел. Для оценки случайной погрешности вычислены стандартные отклонения длин рудных тел и положений их центров, определенных по разным сечениям. Стандартное отклонение длины равно 16 м, положения

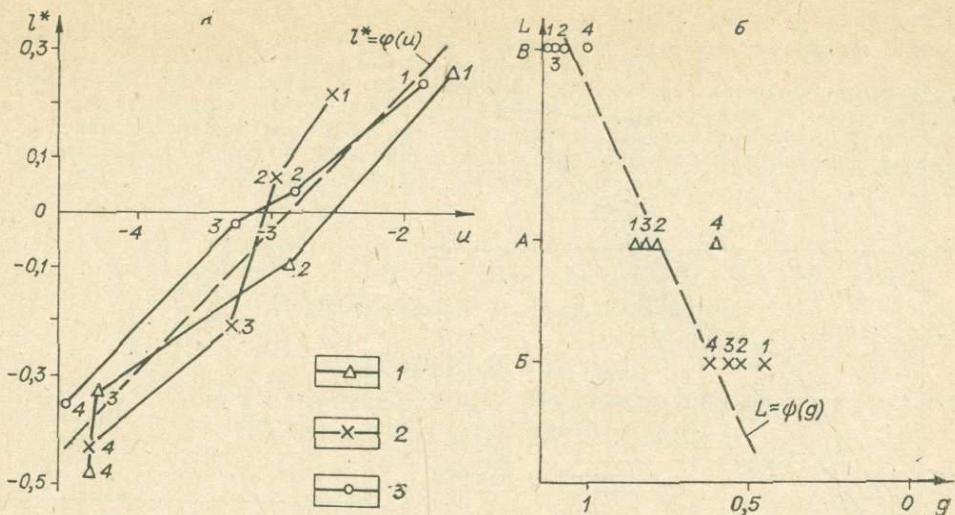


Рис. 3. Графики поведения комбинаций u (а) и g (б) на эталонных рудных телах.
1—3 — рудные тела A , B , V соответственно.

центра — 19 м. На 10%-ном уровне соответствующие доверительные интервалы равны ± 26 и ± 31 м. На месторождении среднее расстояние между выработками в поперечном разрезе равно 56 м. Таким образом, достигнутая точность прогноза соответствует плотности сети опробования.

Второе месторождение относится к золото-теллуридному типу золото-кварцевой формации. Оруденение крайне неравномерно и характеризуется бонанцевым распределением, причем бонанцы располагаются кулисообразно и имеют близкие склонения в плоскости рудного тела. По данным приближенно-количественного спектрального анализа присутствуют в аномальных концентрациях и образуют ореолы, пространственно связанные с рудными телами, следующие элементы: Ag, Pb, Cu, W, Mo, Zn, Sr, Ni, Co, Sc, Ba, V и др., из которых Ni, Co и Sc дают пониженные концентрации в рудных телах. Ореолы всех упомянутых элементов характеризуются слабо контрастной зональностью, которая может быть выражена рядом Ag — Pb — Au — Zr — Sc — Co — Ni — W — Cu. Различные варианты коэффициента зональности, рассчитанные на основе этого ряда, характеризуются максимальными значениями в центральных частях рудных тел, постепенно убывающими как к верхне-, так и к нижнерудным частям. Такое поведение коэффициентов зональности не позволяет использовать их для оценки уровня среза аномалий.

Для применения алгоритма COGEVAR на вертикальной продольной проекции рудного тела выбраны 5 бонанцев в качестве эталонов (рис. 4). Каждый из них опробован не менее чем на 4 уровнях. По 4 бонанцам определялись и соответствую-

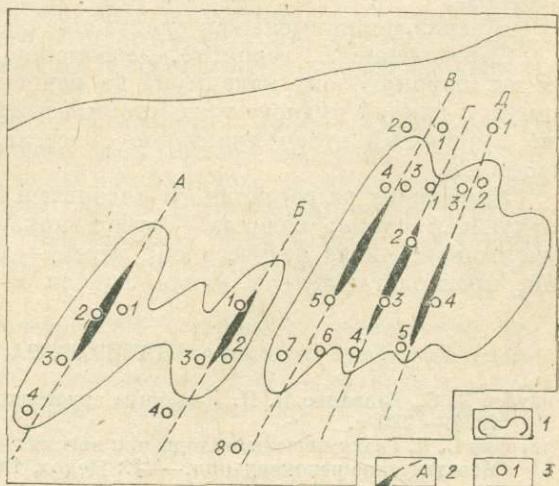


Рис. 4. Вертикальная продольная проекция рудного тела (по Г. Я. Абрамсону).

1 — контур рудного тела по бортовому содержанию; 2 — продольные оси и примерное положение эталонных бонанцев; 3 — горные выработки. Проверка проводилась на бонанце D .

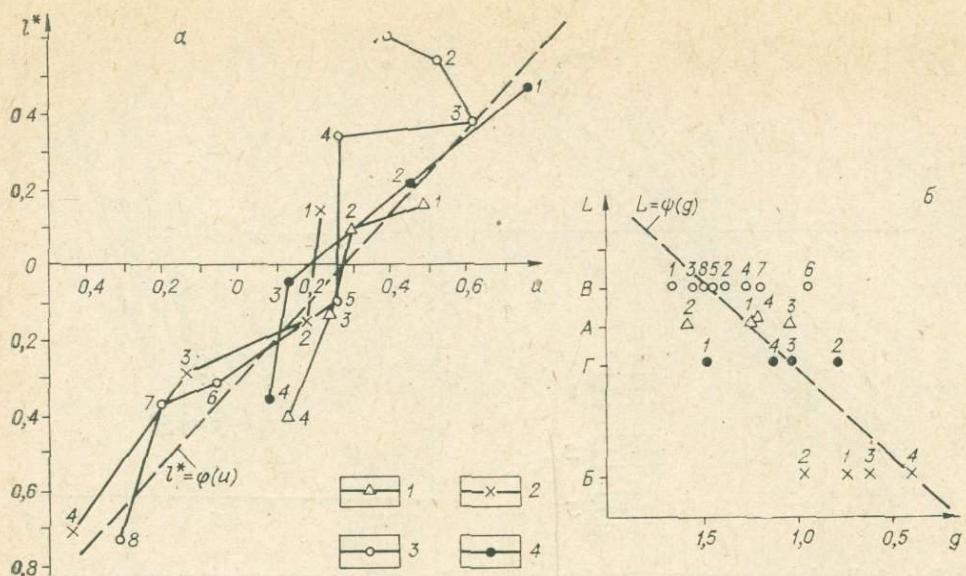


Рис. 5. Графики поведения комбинаций u (а) и g (б) на эталонных рудных телах.
1—4 — рудные тела А, Б, В и Г соответственно.

щие уравнения регрессии. На 5-м бонанце проверялись полученные уравнения. Искомые характеристики имеют следующий вид:

$$u = 0,50\text{Sn} + 0,34\text{Y} + 0,12\text{Ag} + 0,15\text{Co} - 0,93\text{Ba} - 0,30\text{Mo} - \\ - 0,24\text{Sc} - 0,30\text{Cu} - 0,07\text{Yb};$$

$$g = 0,39\text{Sn} + 0,29\text{Yb} + 0,43\text{Ni} + 0,75\text{Zn} + 0,66\text{Ba} + 0,15\text{Ag} - \\ - 0,38\text{Sc} - 0,32\text{Co} - 0,29\text{Zr} - 0,58\text{V} - 0,22\text{Pb} - 0,12\text{Y} - 0,18\text{Cu}; \\ l^* = 1,12u - 0,318; \quad L = -91,9g + 113.$$

На графиках изменения u и g (рис. 5) видны те же их свойства, что и на соответствующих графиках первого месторождения.

Для оценки результатов экзамена вычислены средние погрешности оценок длины рудного тела и расстояний от сечений до его центра. Эти величины составили соответственно 0,8 и 11,6 м. Соответствующие стандартные отклонения оказались равны 26 и 29 м. При среднем расстоянии между выработками вдоль продольных осей бонанцев, равном 50 м, полученные показатели свидетельствуют об удовлетворительной точности прогноза.

В заключение высажем следующие соображения.

Определение L , вероятно, невозможно для тех элементов, которые имеют широкую зону максимума на концентрационном профиле, соизмеримую с длиной рудного тела (стационарный профиль). Поэтому необходим априорный отбор признаков с нестационарным концентрационным профилем.

Улучшение регрессионного алгоритма может быть осуществлено по следующей схеме: сначала — отбор признаков с помощью алгоритма (уменьшение числа регрессоров), затем — применение алгоритма регрессии, предполагающего наличие ошибок в регрессорах.

ЛИТЕРАТУРА

- Голубев В. С., Шарапов В. И. Динамика эндогенного рудообразования.— М.: Недра, 1974.— 280 с.
Григорян С. В. Геохимические методы при поисках эндогенных рудных месторождений. Методические рекомендации.— М.: Недра, 1974.— 215 с.

- Дубов Р. И. Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений.— Новосибирск: Наука, 1974.— 277 с.
- Дубов Р. И., Франковская Н. М., Кошелев В. К. и др. Автоматическая количественная интерпретация геохимических данных.— В кн.: Применение автоматизированных систем и ЭВМ при геохимических исследованиях. Алма-Ата, 1977, с. 3—5.
- Соловов А. П. Современное состояние и перспективы развития геохимических методов поисков.— Вестн. МГУ. Сер. геол., 1978, № 2, с. 3—28.

А. А. ШИМАНСКИЙ, П. Н. РАЙКОВСКИЙ

ПЕРВИЧНЫЕ ОРЕОЛЫ
МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
НОРИЛЬСКО-ТАЛНАХСКОГО ТИПА

Изучение эндогенных ореолов рассеяния на медно-никелевых месторождениях Норильского рудного района, проведенное многочисленными исследователями, показало их несомненную практическую ценность [Барсуков и др., 1981; Додин и др., 1981]. Однако говорить об эффективности использования первичных ореолов для оценки сульфидного оруденения в районе пока нет основания.

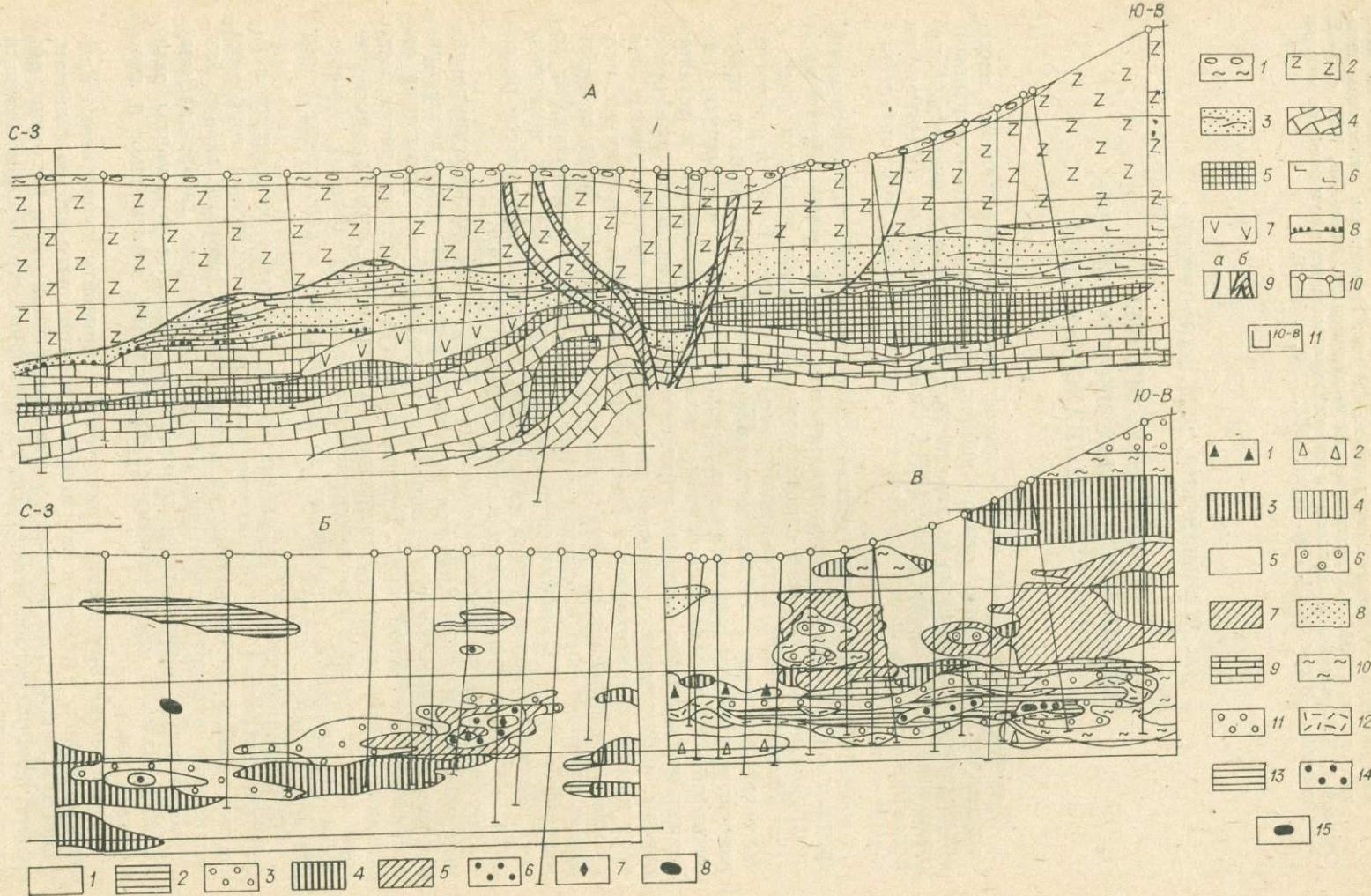
Литологическая и физико-химическая гетерогенность геологической среды, где формируются эндогенные ореолы, требует установления меры неоднородности, выделения относительно однородных участков среды и исследования причин, порождающих неоднородность. В связи с этим естественно рассматривать количественное описание исследуемого пространства как задачу выделения и построения полей, отличающихся различными устойчивыми ассоциациями химических элементов, и установления мер сходства и различия этих коллективов. Так, различные горные породы, окружающие рудоносные интрузии, отличаются различным спектром химических элементов и специфическими взаимоотношениями между ними. Это означает, что выделение таких ассоциаций будет способствовать установлению различных типов пород, зон гидротермальных изменений и отражать генетическую сущность явлений. В этом заключена суть обработки геохимической информации по первичным ореолам рассеяния — методом многомерных полей [Китаев и др., 1976].

Исследуемое месторождение связано с крупным дифференцированным интрузивом габбро-диабазов норильского типа. Месторождение приурочено к верхнему рудному горизонту, представленному пермскими отложениями тунгусской серии. Рудоносные интрузии месторождения представляют собой хонолиты, внедренные в различные стратиграфические горизонты с пестрым литологическим составом — от богатых кремнеземом и глиноземом терригенных до карбонатных и соленосных пород [Ваулин, Суханов, 1970].

Дифференцированная рудоносная интрузия имеет концентрически-зональное строение. В ее разрезе выделяются следующие горизонты (сверху вниз): эруптивные брекчи и контамины, диориты, габбро, безоливиновые и оливинсодержащие породы (пикритовые габбро-диабазы, плагиоклазовые перidotиты и троктолиты), такситовые и контактовые габбро-диабазы. В плане намечаются фронтальная, центральная и прикорневая зоны.

Вкрашенное оруденение приурочено к горизонту существенно оливиновых пород, а также к такситовым и контактовым габбро-диабазам. Медно-никелевые руды залегают в приподошвенной части интрузии, выполняя трещины отрыва и контракции, локальные структурные ловушки и т. д. В целом они тяготеют к осевой части ветви интрузии.

Результаты анализа геохимических проб по скважинам одного из типичных профилей месторождения, послужившие основой для анализа эн-



догенных ореолов, любезно предоставлены нам Сибирской партией ИМГРЭ.

Опробование керна скважин производилось методом пунктирной борозды. Интервал опробования определялся геологическим строением опробуемой части разреза и колебался в довольно широких пределах от 2—3 до 10—12 м в зависимости от мощности прослоев той или иной литологической разности. Средний интервал опробования по коренным породам составлял 10 м.

Опробование способом пунктирной борозды осуществлялось путем отбояки 5—10 мелких кусочков породы размером 3—4 см в поперечнике в среднем через 0,5—1,0 м. Общая масса пробы составляла 150—200 г. Обработка проб сводилась к дроблению, истиранию и сокращению материала пробы до необходимой навески. Анализ проб производился приближенно-количественным спектральным методом с необходимым контролем за качеством аналитических работ.

При выборе круга анализируемых элементов исходили из состава руд (никель, кобальт, медь, серебро, свинец, цинк и др.), типоморфных элементов пород основного и ультраосновного состава (ванадий, титан, хром, марганец), элементов, присутствующих как в интрузивных, так и во вмещающих породах и перераспределяющихся в связи с процессами термального метаморфизма, инфильтрационного и диффузионного метасоматоза (барий, стронций, цирконий, олово и др.). Каждая пробы анализировалась на 17 элементов — никель, кобальт, медь, хром, серебро, свинец, цинк, молибден, барий, стронций, цирконий, сурьма, олово, ванадий, марганец, титан и галлий.

Исходная информация в виде матрицы, где строками являлись пробы, а столбцами химические элементы и координаты проб, была представлена для счета на машине. Общее количество проб составило 1954. Выделено две самостоятельные задачи, границей между которыми является Норильско-Хараэлахский разлом. Задача 1 представляет юго-восточную, а задача 2 — северо-западную часть исследуемого разреза (см. рисунок, А).

Процентные содержания различных химических элементов в пробах при решении поставленной задачи нормированы фоновыми содержаниями. Полученные безразмерные величины называются коэффициентами контрастности. За фоновые содержания приняты 50%-ные квантили содержаний исследуемых химических элементов.

Задача 1. Юго-восточная часть разреза изучена 760 геохимическими пробами, взятыми из керна 13 скважин (см. рисунок, В). Размещение проб по разрезу равномерное, за исключением юго-восточной оконечности разреза, где верхняя часть последней скважины не опробована.

Выделение классов совокупностей элементов производилось автоматически по близости величины коэффициентов контрастности элементов в пробах. Класс считается выделенным и однородным, если основное соотношение между элементами составляет заранее определенный процент общей дисперсии элементов в классе. Таких классов при автоматической

Геологический разрез (А) и поля ассоциаций элементов северо-западной (Б) и юго-восточной (В) частей разреза.

А. 1 — гравийно-галечные отложения, валуны, суглинки, супеси, пески; 2 — базальты порфировые, плагиофировые, пикритовые, двуполевощатовые, лабрадоровые, с титанистым авгитом, толеитовые, туфы и туффиты; 3 — аргиллиты, алевролиты, песчаники с пластами каменных углей; 4 — доломиты, известняки, мергели с прослойками ангидритов, аргиллиты, ангидриты; 5 — габбро-диориты, габбро-диабазы безоливиновые, оливиновые и пикрит-такситовые; 6 — долериты; 7 — пироксеновые роговики, пироксеновые скарны и серпентиновые породы; 8 — стратиграфическое несогласие; 9 — разрывные нарушения (а) и зоны главного тектонического шва (б); 10 — скважины; 11 — контуры исследований. Б. Классы ассоциаций: 1 — А; 2 — Г; 3 — Б; 4 — Д; 5 — Е, В; 6 — Ж; 7 — З; 8 — Й. В. Классы ассоциаций: 1 — Б; 2 — К; 3 — Д; 4 — И; 5 — А, В, Л; 6 — М; 7 — Г; 8 — Н; 9 — Ч, Б; 10 — Е, Ж; 11 — Й, О; 12 — П, Р; 13 — С, Т, Ц, У; 14 — Ф, Х; 15 — Ы, Ш.

классификации оказалось 27. После объединения классов в группы по близости спектров элементов и их пространственному расположению на разрезе число классов сократилось до 15:

Группа классов	Класс	Формула классов	(процентное соотношение контрастности в ассоциациях)	коэффициента
1	Ь	Ti/26	Pb/15 Zn/12 Cu/12 Ni/9 Cr/5 Ba/5	
2	К	Cu/22	Pb/13 Ti/12 Mo/10 Ni/8 Cr/6 Mn/6	
3	Д	Ti/42	Cu/10 Cr/9 Mo/6 Zn/6 Pb/5	
3	З	Ti/33	Cu/30 Cr/6 Ni/5 Ba/4 Pb/4	
4	И	Ti/50	Ba/15 Cu/6 Zr/6 Pb/5 Ga/4 Zn/4	
	А	Ti/19	Ba/16 Cu/13 Cr/8 Pb/6 Mo/6	
5	В	Ti/43	Ba/14 Cu/7 Mo/5 Zn/5 Cr/5	
	Л	Ti/32	Ba/26 Cu/8 Zr/6 Cr/5 Ga/5	
6	М	Ba/60	Cu/15 Ti/10 Zr/4 Mo/2 Ni/2	
7	Г	Ba/26	Ti/23 Cu/14 Mo/7 Zr/6 Ga/5 Ag/4	
8	Н	Cr/29	Ti/24 Mo/13 Cu/11 Ni/8 Ba/5	
9	Б	Cr/23	Cu/17 Ba/13 Ni/12 Ti/11 V/4	
	Ч	Cr/26	Ti/24 Cu/14 Ni/14 Ba/10 Sn/3 Pb/3	
10	Е	Cu/42	Ti/11 Ba/10 Ni/7 Cr/6 Ag/6	
	Ж	Cu/46	Ti/17 Ba/13 Mo/4 Cr/3 Ni/3	
11	Й	Cu/25	Ni/23 Ti/14 Ba/11 Cr/10 Ag/5	
	О	Cu/66	Ag/8 Ni/7 Ba/6 Ti/4 Mo/2	
12	П	Cu/49	Ni/17 Ag/14 Ba/5 Cr/4	
	Р	Cu/76	Ni/8 Ag/5 Ti/3 Ba/2	
	С	Cu/64	Ni/18 Ag/6 Mo/3 Co/3	
13	Т	Cu/76	Ni/12 Ag/7 Cr/2 Co/1	
	Ц	Cu/55	Ni/28 Co/7 Ag/4	
	У	Cu/58	Ni/35 Ag/3 Co/2 Cr/1	
14	Ф	Cu/72	Ni/20 Ag/3 Co/2 Cr/1	
	Х	Cu/86	Ni/26 Co/4 Ag/2	
15	Ы	Cu/54	Ni/43 Cr/1,6 Ag/1	
	Ш	Cu/79	Ni/16 Ag/2 Co/1	

По иерархическим рядам коэффициентов контрастности в каждой выделенной ассоциации установлены главные и второстепенные элементы. В графе «Формула классов (процентное соотношение коэффициента контрастности в ассоциациях)» показаны «веса» коэффициентов контрастности анализируемых элементов, и по ним устанавливаются иерархические ряды. «Вес» элемента — это выраженная в процентах доля, которую составляет коэффициент контрастности рассматриваемого элемента в общей сумме величин коэффициентов контрастности всех элементов, входящих в иерархический ряд.

По величинам процентных соотношений коэффициентов контрастности условно выделяются главные элементы (для которых этот процент более 20), второстепенные (5—20) и элементы-примеси (менее 5).

В юго-восточной части разреза интрузия фиксируется несколькими ассоциациями (10, 11, 12, 13, 14 и 15), создающими четкий многомерный ореол изучаемого объекта (см. рисунок, В). Так, группа классов 15, включающая классы Ы и Ш, представлена главными элементами (медь и никель) и элементами-примесями (серебро, хром и кобальт). На разрезе (см. рисунок, В) группа классов 15 окаймляется группой классов 14, формула которой такова: главные — медь и никель, примеси — кобальт, серебро и хром. Затем группа классов 13, имеющая максимальное распространение на разрезе, содержит элементы: главные — медь и никель, второстепенные — никель, серебро, примеси — молибден, хром, титан, кобальт, барий.

Классы П и Р, входящие в группу 12, имеют в качестве главного элемента медь, второстепенных — никель и серебро, элементами-примесями выступают барий, хром и титан.

Группа классов 11 (классы Й и О) пространственно тяготеет к рассмотренным выше и имеет близкий к ним иерархический ряд, а именно: главные — медь и никель, второстепенные — титан, серебро, барий и хром, примеси — титан и молибден. Спектр второстепенных элементов постепенно расширяется. Особенно резко это проявляется в группе 10 (классы Е и Ж), где в качестве главного элемента сохраняется медь, а круг

второстепенных и примесей возрастает (второстепенные — титан, барий, никель, хром и серебро; примеси — молибден, хром и никель). На разрезе участки распространения группы классов 10 тяготеют к верхней и нижней частям рудоносного интрузива, а также фиксируются на продолжении интрузивного массива и юго-восточной части разреза (см. рисунок, В).

Рассмотренные группы классов (10-15) в полной мере определяют на разрезе местоположение рудоносной интрузии в достаточно узкой полосе, ограниченной подстилающими породами верхнего девона и пластовой интрузией долеритов, т. е. в тех же границах, что и монополя ореолов основных элементов-индикаторов (медь, никель, серебро, хром и кобальт). Это дает право назвать рассмотренные выше классы ассоциацийрудными. Появление некоторых из них (10, 11 и 12) на разрезе выше области распространения рудоносной интрузии можно объяснить влиянием тектоники (зоны разлома, зоны повышенной трещиноватости).

Группы классов 9, 8, 7, 6, 4 и 3 характерны для участков развития пород тунгусской серии, долеритов и базальтов и их следует отнести к группе породных ассоциаций (см. рисунок, В).

Группу 5, включающую классы А, Б и Л, следует выделить как фоновую, где главными элементами являются титан и барий, а второстепенными — медь, хром, свинец, молибден, цинк, цирконий и галий. Эта группа классов занимает основную площадь изучаемого разреза.

Несколько особо ведут себя ассоциации К и Ъ. Ассоциация К приурочена к породам верхнего девона. Ее спектр представлен медью (главный элемент), свинцом, титаном, молибденом, никелем, стронцием и марганцем (второстепенные элементы). Ассоциация Ъ располагается в верхней части рудоносной интрузии вблизи разлома и характеризуется следующей формулой: главный элемент — титан, второстепенные — свинец, цинк, медь, никель, элементы-примеси — хром и барий.

Задача 2. Северо-западная часть разреза изучалась по 1200 геохимическим пробам, отобранным из керна 11 скважин. Размещение проб по разрезу неравномерно. Особенно это хорошо заметно в северо-западной его части, где расстояние между скважинами слишком велико (см. рисунок, В).

Классификация совокупности элементов по близости коэффициентов контрастности привела к выделению 9 классов-ассоциаций, по которым выделено 8 групп классов:

Группа классов	Класс	Формула классов (процентное соотношение коэффициента контрастности в ассоциациях)
1	А	Ti/36 Ba/9 Cu/9 Cr/7 Sr/6 (Ni, Mo, Pb)/5
2	Г	Ni/46 Cr/16 Ti/11 Cu/10 Zn/3 Co/3
3	Б	Cu/61 Ni/14 Ti/5 Cr/4 Ba/3
4	Д	Sr/59 Ni/14 Ba/7 Pb/3 Ti/3
5	Е	Cu/74 Ni/13 Ag/5 Co/1
	В	Cu/49 Ni/36 Ag/3 Cr/3
6	Ж	Cu/70 Ni/23 Ag/4 Co/1
7	З	Cu/47 Ni/44 Ag/3 Cr/3
8	И	Ti/40 Cr/14 Mo/7 Ag/5 Ba/5

Среди выделенных классов-ассоциаций Б, Е, В, Ж и З следует считать рудными, так как они определяют на разрезе положение рудоносной интрузии и область развития ее ореола (см. рисунок, В).

Класс Г, главным элементом которого является никель, второстепенными — хром, титан, медь, элементами-примесями — цинк и кобальт, определяет положение туфов и туффитов на изучаемом разрезе (см. рисунок, В).

Класс Д (главный элемент — стронций, второстепенные — барий, никель, элементы-примеси — свинец и титан) развит в области распространения карбонатных пород верхнего девона. Таким образом, классы Г и Д следует отнести к породным ассоциациям. Класс А (главный элемент — титан, второстепенные — медь, хром, барий и стронций, элементы-примеси — никель, молибден и свинец) следует отнести к фоновой ассоциации,

так как он распределен по разрезу повсеместно независимо от литологических особенностей разреза.

Анализируя построенные полиэлементные геохимические поля в целом по разрезу, можно отметить их сходство и их различие.

Вначале отметим признаки сходства.

—Основные рудные ассоциации, выделенные ЭВМ, пространственно тяготеют к области развития рудоносной интрузии и не выходят за ее пределы.

—Спектр рудных ассоциаций юго-восточной и северо-западной частей разреза идентичен и представлен рядом основных элементов-индикаторов (медь—никель—серебро—кобальт—хром).

—Для выделенных ассоциаций в области развития рудоносных интрузий характерно зональное их размещение по вертикали и горизонтали (см. рисунок, *Б, В*).

—Фоновые ассоциации юго-восточной и северо-западной частей разреза практически идентичны—юго-восток: титан—барий—медь, хром—свинец—молибден—цинк—цирконий и галий; северо-запад: титан—барий—медь—хром, стронций, никель—молибден—свинец.

Отличают рассматриваемые полиэлементные геохимические поля такие признаки:

—различное количество выделенных классов-ассоциаций в северо-западной (9) и юго-восточной (27) частях разреза;

—эпизодическое появление рудных ассоциаций в надинтрузивном пространстве юго-восточной части изучаемого разреза.

Объяснение причин различия полиэлементных геохимических полей заключено в особенностях геологоструктурной обстановки формирования интрузий и ореолов каждой части разреза. Размеры ореолов и их продуктивность, как считает Ф. А. Летников [1981], есть функция многих переменных. Наиболее важны энергетическая мощность тепловой аномалии, ее способность обеспечить длительный массоперенос по вектору градиентов-температур, давлений, химических потенциалов и т. д. По-видимому, условия массопереноса в разных частях разреза отличаются.

Исходя из полученных решений можно предположить, что формирование рудоносных интрузий, рудных залежей и эндогенных ореолов проходило в узко локализованной зоне, ограниченной мощными экранами. Образовавшиеся в таких условиях эндогенные ореолы получают развитие преимущественно в горизонтальных направлениях—продольная и осевая зональности. Развитие ореолов по вертикали (поперечная зональность) ограничено узкой локальной зоной. Неспокойная тектоническая обстановка при длительном формировании рудоносной интрузии делает возможным вынос рудных ассоциаций в надинтрузивные породы, и особенно в зоны глубинных разломов. Последнее позволяет, как считают Д. А. Додин и др. [1981], резко ограничить площади проведения геохимических поисков.

Вскрытым методом многомерных полей особенности строения первичных ореолов сульфидных месторождений норильско-талнахского типа отличаются от представлений других исследователей, поэтому полученные результаты следует считать предварительными. Авторы статьи считают нужным отметить, что решенные задачи на ограниченном фактическом материале носят частный характер и являются единичными. Потребуется еще много усилий и времени, прежде чем станет ясно—насколько общими являются полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

- Барсуков В. А., Григорян С. В., Овчинников Л. Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений.— М.: Наука, 1981.— 318 с.
Ваулин Л. Л., Суханова Е. Н. Октябрьское медно-никелевое месторождение.— Разведка и охрана недр. 1970, № 4, с. 48—51.
Додин Д. А., Шатков В. А., Додина Т. С. и др. Геохимические поиски медно-никелевых месторождений по первичным ореолам рассеяния.— В кн.: Второй Международ-

ный симпозиум «Методы прикладной геохимии». Ч. 1. Иркутск, 1981, с. 156—157.

- Китаев Н. А., Евдокимова В. Н., Чумакин В. Н. Построение эмпирических моделей зональности рудных тел и их ореолов.— В кн.: Математическая обработка данных в поисковой геохимии. Новосибирск: Наука, 1976, с. 115—131.
- Летников Ф. А. Теоретические аспекты процессов формирования эндогенных ореолов.— В кн.: Второй Международный симпозиум «Методы прикладной геохимии». Ч. 1. Иркутск, 1981, с. 42—43.

• Н. А. КИТАЕВ, П. В. БОГАТЫРЕВ

О КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Общеизвестно положение о том, что главной и более сложной задачей современной поисковой геохимии является не выявление аномалий, а их количественная оценка. Хотя уже имеется ряд оригинальных научных разработок в этом направлении, однако они полностью еще не удовлетворяют потребности практики, поскольку направлены главным образом на оценку оруденения, выходящего на поверхность, или имеют сложный математический аппарат, в котором определить некоторые важнейшие критерии пока невозможно, или же не учитывают некоторые геологические факторы. В связи с этим необходимы дальнейшие поиски путей решения этой сложнейшей задачи геологии, очевидно в различных направлениях и с использованием как эмпирических данных, достигнутого уровня знаний по геологии месторождений, так и теоретических представлений. Последние основываются на моделях ореолообразования, где за основу, вероятно, необходимо брать главный универсальный критерий — энергию рудообразования в понимании Н. И. Сафонова. Бессспорно, что чем выше энергия концентрации геохимического поля, тем более она перспективна. Геологическими признаками этого являются, как известно, высокая дисперсия концентраций химических элементов, максимальная сложность минеральных комплексов, соответствующие наибольшей энергии их образования (фазовому состоянию вещества), экстремальное преобразование горных пород, определяемое отношением коэффициентов привноса и выноса рудных и петрогенных элементов, и т. д.

Проблему количественной оценки можно подразделить, на наш взгляд, на четыре главнейшие взаимосвязанные задачи: 1) отображение состава и структуры геохимического поля (аномалии), максимально приближенное к реальной действительности, в количественных характеристиках, т. е. составление геохимических карт; 2) определение формационной принадлежности аномалий; 3) установление эрозионного среза (зональности); 4) определение возможного масштаба оруденения.

Ниже рассматривается один из возможных путей решения этой проблемы, основанной на использовании и дальнейшем развитии метода многомерных полей.

Наиболее разработана, очевидно, первая задача. Ее решение на определенном уровне сказалось и на практике поисковых работ. Сейчас в большинстве производственных геологических объединений (ПГО) внедрены различные методы построения геохимических карт с использованием ЭВМ. Широко известен метод многомерных полей (МП), разработанный в Институте геохимии СО АН ССР и Иркутском государственном университете [Китаев и др., 1974, 1976; Евдокимова, 1978; Поликарпочкин и др., 1979] и внедренный в основном в восточных ПГО страны. Метод основан на автоматическом выделении ассоциаций химических элементов, главным образом по величинам их коэффициентов контрастностей (КК), на построении поли- и моноэлементных геохимических карт и их количественном описании.

Указанный метод обработки геолого-геохимической информации дает возможность анализировать закономерности многих химических элемен-

тов в природных системах, т. е. на количественной основе выявлять геохимические типы ореолов, обусловленные как многоэтапностью формирования месторождений, так и наличием различных типов минерализации, и позволяет подойти к решению проблемы геолого-геохимического прогнозирования. В совокупности поли- и моноэлементные карты несут в себе принципиально новую информацию, в связи с чем ее интерпретация является сложной, не менее ответственной задачей, требующей повышенной квалификации геологов. Не останавливаясь на подробностях, отметим лишь, что первым этапом интерпретации должен быть анализ таблиц КК. В связи с все еще имеющимся несовершенством программ иногда выделяется большое количество классов, которые при этом анализе объединяются в группы по амплитудам варьирования КК различных элементов или (и) генетическим признакам. Поэтому рисовка карт по условным индексам должна проводиться после анализа таблиц КК и корректировки карты фактического материала, полученной на ЭВМ по заданным координатам с тopoосновой, используемой при съемке. Наиболее интересный и сложный момент в интерпретации карт многомерных полей — выявление соответствия выделенных классов с разновидностями гидротермальных изменений и детальной структуры геохимического поля. При этом учитывается, что выделенные классы не всегда соответствуют геохимической ассоциации. Иногда последняя представлена рядом родственных классов с одинаковыми соотношениями элементов, но с разными абсолютными величинами их содержаний; или в одном классе могут быть две и более геохимических ассоциаций. В связи с этим при сопоставлении классов и полей с различными типами гидротермальных изменений производится интерпретация с выделением геохимических ассоциаций, соответствующих лишьенным типам изменений. Рисовка карт и интерпретация производятся на геологической основе с целью одновременного сопоставления групп элементов (лито-, халько- и сидерофильных) с типами горных пород и разновидностями гидротермальных изменений. Полная и качественная геологическая информация получается при комплексной интерпретации всех поли- и моноэлементных карт. Решение задач геохимических съемок на многих объектах, в различных масштабах и типах сред показало высокую эффективность этого метода.

Задача определения формационной принадлежности геологических объектов также решается давно. Однако в опубликованной литературе главным образом рассматриваются примеры использования особенностей элементного состава различных минералов с целью установления их принадлежности к определенному типу месторождений (пиритов — Федорчук, Никифоров, 1968; турмалинов — Кузьмин и др., 1979; Китаев, Богатырев, 1982) или закономерностей распределения и содержаний редких элементов в гранитоидах [Урунбаев и др., 1977] или породообразующих минералах [Ставров, 1981] для их формационного деления. Вопрос определения формационной принадлежности геохимических аномалий практически не рассматривался. Мы полагаем, что новый метод анализа традиционного фактического материала (МП) несет в себе потенциальные резервы и для определения формационного типа оруденения и прогнозной количественной оценки оруденения. Формационный тип аномалии можно определять на основе выявления и сравнения элементных ассоциаций и их КК. Обобщение большого количества материалов решения задач методом МП эталонных объектов по первичным ореолам (табл. 1) и потокам рассеяния (табл. 2) позволило вывести геохимические формулы металлогенических формаций.

Для каждой металлогенической формации свойственные свои ассоциации основных элементов с высокими, средними, а также низкими КК, связанными главным образом с гидротермально измененными породами.

Решение обратной задачи методом аналогии позволяет определять формационный тип исследуемой аномалии на ЭВМ, т. е. качественный и количественный состав элементов в аномалии и другие признаки дают возможность «узнавания» типа оруденения и его генетических особенностей.

Таблица 1

Геохимические формулы металлогенических формаций (по первичным ореолам)

№ п/п	Формация	Химические элементы		
		основные с высокими КК	постоянно встречающиеся, со средними КК	не всегда встречающиеся с КК 2–5
1	Золоторудная	Au, $\frac{\text{Ag, As, Sb}}{50-100(1000)*}$	Pb, Cu, Zn, Bi $(50-100)10$	Tl, B, Rb, Cs, Te, Ge, Sr, Mo, W, Co, Ni, Cr, Mn, F, P
2	Золоторудная (прожилково-вкрашенного типа в черносланцевых толщах)	Au	$\frac{\text{As, Ag}}{4-20}$	Pb, Cu, Co, Mn, Ni, Ba
3	Золоторудная (кварцевожильный тип в черносланцевых толщах)	Au	$\frac{\text{Ag}}{4-35(120)}$	Co, Cu, Ni, Bi, As, Zn
4	Золото-полиметаллическая	Pb, Ag Au, $\frac{200-500(>800)}{10(100)}$; Sb, Zn	$\frac{\text{Cu}}{4(30)}$	B, As, Sn, Ba, Mo, Ti, Co, Cs, V, Ni, W
5	Полиметаллическая	Pb, Zn; $\frac{10-100(>500)}{10-100(>100)}$; Ag, Cu, As	$\frac{\text{B}}{20-50}$	Sn
6	Оловянно-полиметаллическая	Sn, Ag, Pb, Zn $\frac{60(100 \text{ и } >)}{20-50(60 \text{ и } >)}$; As, W	$\frac{\text{B, Cu}}{\text{до } 10(10-20)}$	F, Rb, Cs, Bi, Mo, Cl
7	Колчеданно-полиметаллическая	Sb, Ag $100(2000)$	$\frac{\text{Pb, Zn, Cu, Cr, As}}{5-30}$	Ni, Mn, P
8	Оловянная	Sn, Ag, Bi, As, B, F $100(?)$	$\frac{\text{Zn, Cs, Mo, Rb, W, Pb, Cu}}{10-50(?)}$	Cl, P
9	Молибденовая	Bi, Mo, Ag $100(>150)$; Ni, As, W $10(>100)$	$\frac{\text{Zn, Pb, V, B, Cu, Co}}{(20-50) \text{ до } 10}$	Sn, Be, F, Mn
10	Вольфрамовая	W $100-600(>1000)$; Ag, Bi, Sn $30-50(100)$	$\frac{\text{Mo, Zn, Pb, Cu}}{(10-60)10}$	F, Ba, Sr

Примечание. КК — коэффициенты контрастности. Звездочкой отмечены пределы колебаний КК, в скобках даны максимальные КК. Геохимические формулы составлены по данным: 4 — Л. Д. Зориной и др. [1983]; 5 — Б. П. Санина и Л. Д. Зориной [1978]; 9 — С. Г. Петровской и др. [1980]; 10 — Л. В. Таусона, А. Р. Коршевой [1978]; 2 — А. А. Пузанова [1983]; остальное — авторов статьи.

Важнейшей задачей количественной оценки является определение эрозионного среза геохимических полей. Попытки использования формул, выведенных на основе теоретических представлений о характере миграции вещества распределения элементов по глубине месторождений с целью определения эрозионного среза пока не привели к практическим результатам в связи с неопределенностью многих параметров (коэффициенты

Таблица 2

Геохимические формулы металлогенических формаций (по потокам рассеяния)

№ п/п	Формация	Ассоциации элементов Коэффициенты контрастности	
1	Золоторудная	Au; $\frac{\text{Ag, As, Bi}}{3-70}$; $\frac{\text{Pb, Cu, Zn, Mo}}{2-9}$	
2	Золоторудная (прожилково-вкрашенного типа в черносланцевых толщах)	Au; $\frac{\text{V, Cr, La, Nb}}{2,0-2,9}$; $\frac{\text{Ag, Pb, As, F, B}}{1,1-1,5}$	
3	Золоторудная (кварцевожильного типа в черносланцевых толщах)	Au; $\frac{\text{Ag}}{3}$; $\frac{\text{Ge, Cr, Y}}{1,6-2,0}$; $\frac{\text{Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Mo, Bi}}{1,0-1,7}$; $\frac{\text{La, Ga}}{1,0-1,7}$	
4	Золото-полиметаллическая	Au; $\frac{\text{Ag}}{20-40}$; $\frac{\text{Pb, Zn, Cu}}{2-14}$; $\frac{\text{As, Mo, W, Bi}}{2-6}$	
5	Полиметаллическая	$\frac{\text{Zn, Ag, Pb}}{2-25}$; $\frac{\text{Mo, Sn, B, As, Mn}}{2-5}$; $\frac{\text{Co, Zr, Bi}}{1,5-1,9}$; $\frac{\text{Cu, Cr, Ga, V, Sc}}{0,8-1,8}$	
6	Оловянно-полиметаллическая	$\frac{\text{W}}{130}$; $\frac{\text{Sn, Bi, As, Ag}}{5-20}$; $\frac{\text{Cu, Pb, Zr}}{3}$	
7	Колчеданно-полиметаллическая	$\frac{\text{Ag}}{90-400}$; $\frac{\text{Pb, Zn}}{5-60}$; $\frac{\text{Sn, Cu}}{3-5}$	
8	Оловянная	$\frac{\text{Bi}}{56}$; $\frac{\text{Sn, W, Ag, As, Cu}}{8-18}$; $\frac{\text{Pb, Zn}}{4}$; $\frac{\text{Y, Mo}}{2}$	
9	Молибденовая	$\frac{\text{Mo, W, Bi, Au, Cu}}{20-70}$; $\frac{\text{Pb, Zn, Cu, B, Ga, Sn, As}}{3-8}$ $\frac{\text{Ni, Co, Ge, V, Zr, P, Ti}}{0,2-1}$	

Примечание. Геохимические формулы составлены по данным: 4 — В. А. Романова и Н. Б. Саниной [1984]; 6, 8 — Л. А. Филипповой [1977]; остальное — авторов статьи.

равновесия и скоростей адсорбции, диффузии, химических реакций, длительности времени рудообразования и т. д.). Применение эмпирических формул, описывающих распределение концентраций главных элементов, также малоэффективно, поскольку они могут быть использованы лишь на изученных эталонных месторождениях и при наличии двух и более сечений [Китаев, 1969]. Наиболее широко распространен в настоящее время метод определения среза по эмпирически наблюдаемому характеру распределения рудных элементов — по комплексу над- и подрудных элементов в соответствии с «универсальным рядом зональности», предложенным Л. Н. Овчинниковым и С. В. Григоряном (1970), в общем согласующимся с зональным развитием минерализации, отмеченной в свое время В. Эммонсом. Вместе с тем нередко приходится сталкиваться с зональностью, в высшей степени отличающейся от вышеотмеченной в силу многих причин. Следует напомнить, что в природе фиксируется постепенная смена максимумов содержаний элементов, т. е. в каждой зоне или точке тот или иной металл (элемент) может лишь преобладать в совместно встречающихся комплексах (ассоциациях) элементов.

Метод МП, основанный на взаимоувязке всех элементов и выявлении последовательной смены не отдельных элементов, а их ассоциаций, позволяет отображать более реальную зональную картину сложного развития

процессов рудообразования с выявлением ореолов рудных полей и месторождений, стадийной зональности и зональности отложения. На рисунке в качестве примера представлена структура ореолов рудных полей (в плане) и ореолов месторождений (в разрезе), выявленных методом МП. На оловорудном месторождении (по данным Л. В. Таусона и др. [1978]) минерализация распределена зонально относительно штока гранит-порфиров: (см. рисунок, I) грейзеновая (A) вблизи штока сменяется кварц-кассiterитовой и кассiterит-пирит-пиротиновой (B), кассiterит-хлоритовой (B) и кварц-кальцитовой (Γ). В соответствии с этим в ореолах по мере удаления от интрузии происходит смена ассоциаций с уменьшением КК W, Sn и As и увеличением Pb, Zn, Ag. В разрезе штокверка другого месторождения оловянная ассоциация, обусловленная редкометалльно-гнейзеновой минерализацией, занимает центральное положение, а кварц-полевошпатовая минерализация максимально проявлена в верхней части разреза. В результате в ряду зональности эта минерализация занимает не свойственное ей верхнее положение (см. рисунок, I').

На молибденовом поле, по данным С. Г. Петровской и др. [1980], происходит смена полей ассоциаций элементов от периферии Pb, Ag, B на Mo, Rb; Mo, Bi, Pb или Mo, W в центральной части и вновь на Pb, Ag, B — на другом фланге (см. рисунок, II). В разрезе этого месторождения зональность зависит от появления в низах или в верхах сечения гранит-порфиров. В первом случае (см. рисунок, II') в нижней части разреза появляются элементы, более типичные для надрудных интервалов (Ag, As), во втором — в верхах разреза увеличивается контрастность содержаний Pb, B, Ag и др., уменьшаются КК W и исчезают F и Cl (см. рисунок, II''). То есть в первом случае фиксируется обратная, во втором — прямая зональность.

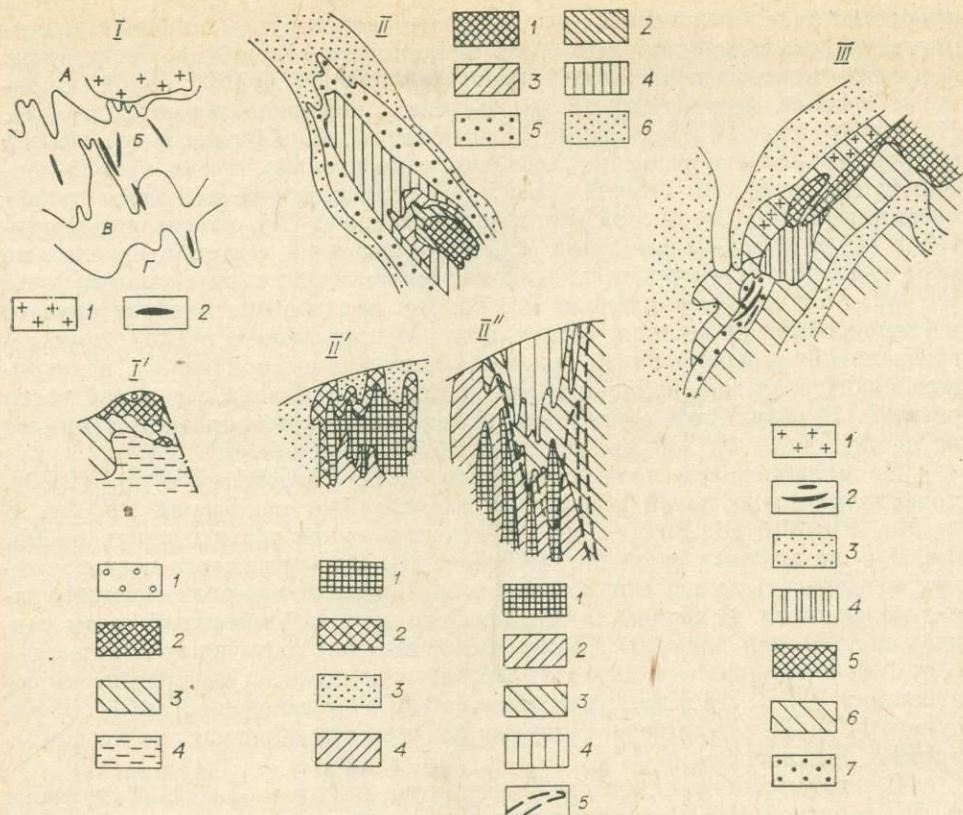
На вольфрамовом месторождении, по данным Л. В. Таусона и А. Р. Корневой [1978], в рудном поле с ранним гнейзеновым этапом связан серебряно-молибденовый ореол, приуроченный к центральной части редкометалльной интрузии, серебряно-висмут-олово-вольфрамовый ореол, связанный с поздним гнейзеновым этапом, расположен на периферии молибденового ореола, а серебряно-висмут-вольфрамовый ореол, связанный с гидротермальным этапом, охватывает экзоконтактовую зону интрузии (см. рисунок, III).

В разрезе золотополиметаллического месторождения, по данным Л. Д. Зориной и др. [1983], на нижних горизонтах колчеданная минерализация с ассоциацией элементов As, Au, Zn сменяется на средних горизонтах сульфосольной (Ag, Sb, Cu, Bi, Pb, Au) и турмалиновой (Pb, Au, B) — на верхних.

Зональность первичных ореолов близповерхностных золото-серебряных месторождений хорошо согласуется с полями распространения разновидностей гидротермально измененных пород. Региональная пропилитизация фиксируется ореолами больших размеров при невысоких концентрациях (2—5, редко до 10)* Au, Ag, Cu, Pb, W и малой дисперсией их содержаний. Линейно вытянутые ореолы рудных зон выявляются по повышению уровня концентраций и дисперсий этих элементов на фоне ореолов региональной пропилитизации. Месторождения отличаются высокими контрастностями и дисперсиями Ag (100—1000), средними (10—100) Pb, Zn, Cu, Sb, Hg и Bi.

В разрезе кругопадающих рудных тел, в верхних частях преобладает ассоциация Ag, As, Sb, Hg (10—100), в центральных — Au, Ag (50—500), (5—10), в нижних — Au, Ag (40—50), Cu, Bi, Mo, W (5), в подрудных — Mo, Sn, W (5). В субгоризонтальных рудных телах в висячем боку преобладает ассоциация Sb, As (50—10), в осевой части — Ag, Au (40—250), Sb, As, Cu (5—35), в лежачем боку Bi (200), Sn, Pb, Ag, Zn (5—12), а в безрудных участках — Cu, Pb, W, Bi, As (2—5).

* Здесь и далее в скобках даны КК.



I — ореолы олововорудного поля (по Таусону и др. [1978]); 1 — гранит-порфиры;
2 — рудные зоны; средние КК элементов в зонах

	Sn	Pb	Zn	Ag	As	W		Sn	Pb	Zn	Ag	As	W	
A	2,3	1,3	5,0	2,0	1,4	1,5		B	1,4	1,5	5,5	2,3	1,3	1,0
B	1,5	4,5	5,3	3,7	1,4	1,0		C	1,4	1,6	5,0	1,3	1,3	1,0

I' — ассоциации элементов в разрезе штокверка этого же месторождения

Номер ассо-циации	Sn	Ag	As	W	Zn	Pb	Номер ассо-циации	Sn	Ag	As	W	Zn	Pb
1	34	58	72	16	38	22	3	586	50	77	82	23	6
2	73	33	80	40	14	2	4	96	49	56	1200	10	6

II — ассоциации элементов молибденового рудного поля (по Петровской и др. [1980])

Номер ассо-циации	Mo	W	Cu	Pb	Zn	Ag	B
1	44	63		38	11	10	
2	183	139	12	45		12	
3	161			14			
4	33			74			
5	59			550	12	91	
6				45			17

II' — ассоциации элементов этого же месторождения (гранит-порфиры внизу разреза)

Номер ассо-циации	Mo	W	F	Cu	Pb	Ag	Номер ассо-циации	Mo	W	F	Cu	Pb	Ag
2	489	61	38	7	6	6	4	55	438	7	17	8	
3	161	76	10	7	4		5	224			52	52	

II'' — ассоциации элементов в разрезе месторождения (гранит-порфиры вверху разреза); 5 — контур тела гранит-порфиров

Номер ассо-циации	Mo	W	Bi	F	Cu	Ag	Sn	Pb	B	Zn	As
1	440	16	16	10	8	4	4				
2	119	78	14	10	6	3	32	12	47	45	
3	84	16	23			21				17	9,5
4	12	15	52			54	6	5	111	13	10

Несмотря на то что учитываются отмеченные особенности характера оруденения и ореолов, свидетельствующих о том, что универсальные ряды зональности могут быть выдержаны лишь в частных случаях, опыт показывает: некоторые известные примеры прогнозирования могут не давать удовлетворительных результатов. Это обусловлено тем, что монотонность изменения отношений надрудных к подрудным элементам выдерживается не всегда (только в случае с очень простым строением месторождения: если оно сформировано в один этап, имеет один тип минерализации и прямую зональность отложения — что является исключительно редким явлением). Как правило, кривая отношения элементов надрудных к подрудным имеет несколько максимумов, поэтому по характеру этой прямой определение положения сечения относительно зоны изучаемого оруденения не всегда возможно. В ряде случаев монотонный показатель, как справедливо отмечено [Поликарпочкин и др., 1979, с. 40], может выдерживаться для второстепенных элементов, «а главные в них не входят, вследствие чего, очевидно, теряется наиболее ценная часть исходной геохимической информации». Даже при наличии монотонных изменений коэффициентов зональности по величинам этих коэффициентов трудно сказать о положении сечения, так как одно и то же значение коэффициента может быть характерным для над- и подрудного сечений. Отсутствие монотонных показателей зональности обусловлено природой месторождений — многоэтапностью процесса, перераспределением вещества вмещающих пород и отгонкой ряда элементов кислотным выщелачиванием с образованием надрудных кремнистых метасоматитов на некоторых близповерхностных месторождениях и т. п. Все эти особенности генезиса месторождения, как отмечено, более реально отражаются в характере полизлементных геохимических полей ассоциациями элементов, в связи с чем их использование для прогноза на глубину представляется перспективным направлением. Ассоциации элементов закономерно изменяются с глубиной и на каждом сечении имеют отличительные особенности.

В табл. 3 показана зональность ассоциаций в одном из типов рудных месторождений. В целом зональность и, следовательно, эрозионный срез определяются по комплексу геохимических формул, характеризующих в конечном итоге структуру рудоотложения и перераспределение вещества горных пород в пределах месторождений. Для золоторудных месторождений выделяются четыре группы критерiev: 1 — качественная смена ассоциаций и геологические признаки; 2 — отношения, характеризующие перераспределение окислов, $\frac{\text{CaO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O}}$

$\frac{\text{CuO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CO}_2}{\text{P}_2\text{O}_5 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$, $\frac{\text{K}_2\text{O}}{\text{Na}_2\text{O}}$; 3 — элементов гидротермалитов и вмещающих пород $\frac{\text{Ba} + \text{Li} + \text{B} + \text{Mn}}{\text{W} + \text{Mo} + \text{Cr} + \text{Ni}}$; 4 — рудных элементов $\frac{\text{Ag}}{\text{Au}}$, $\frac{\text{As} + \text{Sb}}{\text{Au}}$, $\frac{\text{Pb} + \text{Cu} + \text{Zn} + \text{Bi}}{\text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg}}$, $\frac{\text{Pb} + \text{Cu} + \text{Zn} + \text{Bi}}{\text{W} + \text{Mo} + \text{Co} + \text{Ni} + \text{Cr}}$.

Новый метод анализа традиционного фактического материала может быть использован не только для выявления зональности, но и для отыскания объективных зависимостей между полями различных ассоциаций элементов и геологическими критериями. В принципе данную зависимость

III — ассоциации элементов вольфрамового рудного поля (по Таусону, Корневой [1978]); 1 — лейкократовые граниты; 2 — кварц-глинеритовые жилы

Номер ассоциации	W	Bi	Ag	F	Sn	Zn	Mo	B
3	10	4	3	2				
4				12				
5	220	15	15		120		130	
6	60	11	8				25	
7	430	40	32			30		

Таблица 3

Зональность ассоциаций элементов-спутников золота в ореолах разноглубинных месторождений

Зона рудоотложения	Смена ассоциаций сверху вниз (в скобках средние коэф. контрастности)
Близповерхностная	Hg(300); Sb, Ag, As(10—50) Cu, Pb(3—6); Sb, Ag, Hg(100—500); Sb(200—500); As, Ag(100—200); Pb, Cu(3—4); Hg(30—60) As, Sb(200—300); Ag(150—200); Cu, Pb(2—3); Hg(50) Ag(200—300); As, Sb(100—150); Hg, Li(2—50) Ag(300—500); As, Sb(50—100); Hg, Li(2—30) <u>As, Ag, Hg(50—100); Pb(5—10)</u>
Гипабиссальная (субвулканическая) верх	Pb, As, Ag(50—100); Zn, Sb(10—50) Zn, As, Ag, Sb(50—100) As, Ag, Sb(100—500); Bi(50—300); Zn, Cu(5—10) Ag, Sb, As(100—1000); Bi(100—500); Zn, Cu(10—100) Sb(100—500); As, Ag(100—300); Bi(200—800); Cu(150) Cu(50—100); Bi, Ag(100—300) <u>Bi(200—500); Ag, Cu(50—100); B(10—50)</u> B(10—100); Co, Ni, Cr(2—3)
низ	Co, Ni, Cr(5—10) Ba, B, Mn, Hg(2—10); As, Sb(5—10) As, Sb(20—100); Ag, Bi(5—10); B(2—5) As(10—50); Ag(15—30); Bi, Rb, Cu, Zn(2—10) <u>Bi, B(2—20); As, Ag, Sr(2—10); Mo, W(3—30); Co, Ni, V, Cr(2—10)</u>
Среднеглубинная верх	Hg, Mn(3—100); B, Li, Cr(3—10) W, Mo(2—50); As(10—100) Zn, Pb, Bi, Sb(2—10); As(20—200) Ag, Bi, W, Mo(2—50) <u>Mn, Mo, W, Sn, Ag, Hg(2—10)</u>
низ	As(2—100); Zn, Cu, Ag(2—20) Ag, Cu, Bi, Mo, W(5—50) W, Mo, Bi(5—50); Pb, Cu, Ag(2—30) <u>Mo, Co, Sn, Bi(2—10)</u>
Глубинная	B, As(4,5—2) As, Ag, Cu(2—4); Mn, Ba(2); Co, Ni, Cr(1—1,5) As(10—30); Pb, Ag, Zn(2, 6); Co, Ni, Mn, Ba, B, Cr(1—1,5) <u>As(5—10); Mn, Ba, Cr(1—2)</u>
Ассоциации элементов: надрудных устойчивых » неустойчивых рудных неустойчивых подрудных устойчивых » неустойчивых	Ag, Sb, Mn, Hg As, Li, W, B, Pb, Cu, Cr, V, Ge, F, Rb, Cs, Cl Bi, W, Mo, Pb, Cu, P, Tl, Te Mo, Co, Sn B, Cr, Cu, Zn, Bi, Sr
Сквозные элементы для месторождений всех типов и глубин	As, Hg, Li, Ag, Mn

Приложение. Подчеркнуты ассоциации элементов, свойственные для центральных частей ореолов.

для различных видов ореолов (потоки рассеяния, вторичные и первичные ореолы) можно выразить формулой

$$Q = \Pi \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3,$$

где Π — площадная продуктивность металла (элемента), определяемая по формуле $\Pi = \sum_1^n C_i \cdot S_i$, где C_i — среднее содержание того элемента в ассоциации; S_i — площадь, занимаемая данной ассоциацией; \sum_1^n — сумма продуктивностей ассоциаций от 1 до n ; K_1 , K_2 , K_3 — коэффициенты (K_1 — зональности или глубина оставшегося оруденения, K_2 — типа оруденения, K_3 — рудоносности — доля промышленных ресурсов в общих запасах металла в ореоле).

Площадная продуктивность определяется по количественным показателям, полученным на ЭВМ, при решении задачи классификации. Ее можно определять как для всей исследуемой площади, так и для отдельных участков. Этот показатель является объективной величиной, характеризующей, при соответствующем его преобразовании, запасы металлов (элементов) с различными их содержаниями по участкам и по району в целом.

Все коэффициенты являются вероятностными величинами. Степень правильности их определения фиксирует степень достоверности запасов.

Необходимость введения коэффициента зональности (K_1) определяется различным уровнем эрозионного среза ожидаемого оруденения. Он определяется путем анализа полизлементной карты, на которой выводятся для каждой ассоциации количественные показатели — отношение пар родственных элементов, отношение элементов привноса и выноса и (или) отношение надрудных элементов к подрудным, известное в литературе как коэффициент зональности. При определении прогнозных запасов совершенно необходимым, на наш взгляд, является введение коэффициента (K_2), учитывающего генетический тип ожидаемого оруденения. Практика показала, что часто интенсивность ореолов не соответствует масштабам оруденения: высокие содержания полезного компонента в ореолах и большие его размеры нередко обусловлены оруденением, характеризующимся небольшими линзообразными телами со сравнительно невысокими средними содержаниями металла (например, некоторые золотоносные скарпы), и наоборот, иногда значительные по масштабам оруденение на поверхности фиксируется лишь очень слабыми ореолами (зоны рассеянной сульфидной минерализации, близповерхностные золоторудные месторождения и т. д.). Кроме того, тип оруденения определяет и потенциальные качества руд. Поэтому без достаточного знания геологии участка и ее учета все расчеты могут быть ошибочными. Также необходимо определение коэффициента рудоносности (K_3) и пропорциональности между типом ореола и его продуктивностью и продуктивностью ожидаемого рудного тела (месторождения). При определении коэффициента рудоносности прежде всего важно разбраковать геохимические поля на потенциально нерудоносные (низкие КК главного элемента и отсутствие критерия по элементам-спутникам), ограниченно рудоносные и рудоносные (высокие КК элементов и дисперсий). Все три коэффициента пока не могут быть определены абсолютно точно, как, например, продуктивность ореолов. Объективность их определения зависит от изученности района, знания геологии и интуиции геолога. Сложная зависимость интенсивности ореолов от эрозионного среза изучаемых объектов, генетического типа и качества руд и др. указывает на необходимость осторожного отношения к оценке статистическими приемами без учета геологических факторов.

Указанные приемы в конечном итоге позволят получить на ЭВМ полизлементные геохимические карты с определением формационного типа аномалий, эрозионного среза и общих ресурсов элементов на исследован-

ной площади (количественная металлогеническая оценка региона, района, площади), а по ассоциациям рудных элементов с повышенным уровнем концентраций и дисперсий — прогнозные запасы металлов.

ЛИТЕРАТУРА

- Евдокимова В. Н. Автоматизированная система обработки геолого-геофизической информации методом многомерных полей.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск: Наука, 1978, с. 3—26.
- Зорина Л. Д., Романов В. А., Санина Н. Б., Андрулайтис Л. Д. Эндогенные аномальные поля и потоки рассеяния в купольных структурах.— В кн.: Проблемы прикладной геохимии. Новосибирск: Наука, 1983, с. 83—88.
- Китаев Н. А. Эмпирические формулы для распределения концентраций элементов по глубине месторождений.— В кн.: Ежегодник СибГЕОХИ. Иркутск, 1969, с. 213—216.
- Китаев Н. А., Богатырев П. В. Особенности турмалинов золоторудных месторождений.— Докл. АН СССР, 1984, т. 274, № 5, с. 1182—1184.
- Китаев Н. А., Евдокимова В. Н., Чумакин В. Н. Построение эмпирических моделей зональности рудных тел и их ореолов.— В кн.: Математическая обработка данных в поисковой геохимии. Новосибирск: Наука, 1976, с. 115—131.
- Китаев Н. А., Евдокимова В. Н., Чумакин В. Н., Сыклен С. В. Классификация геохимических свойств геологических объектов в связи с изучением их зональности и генезиса.— Геол. и геофиз., 1974, № 6, с. 135—140.
- Кузьмин В. Л., Добропольская Н. В., Солнцева Л. С. Турмалин и его использование при поисково-оценочных работах.— М.: Недра, 1979.— 269 с.
- Овчинников Л. Н., Григорян С. В. Закономерности состава и строения первичных геохимических ореолов сульфидных месторождений.— В кн.: Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Ч. I. II сессия СГПМ. Иркутск, 1970, с. 3—36.
- Петровская С. Г., Санин Б. П., Спиридонова А. М., Страгис Ю. М. Первичные ореолы молибденовых месторождений Сибири.— Новосибирск: Наука, 1980.— 95 с.
- Поликарпочкин В. В., Зонтов В. Н., Евдокимова В. Н. Прогнонтирование оруденения на глубину по геохимическим ассоциациям.— В кн.: Геохимические методы поисков месторождений цветных металлов. Новосибирск: Наука, 1979, с. 38—44.
- Пузанов А. А. Первичные ореолы Советского золоторудного месторождения.— В кн.: Геохимические поиски по первичным ореолам. Новосибирск: Наука, 1983, с. 73—81.
- Романов В. А., Санина Н. Б. Зональность потоков рассеяния в одной из вулканокупольных структур Забайкалья.— В кн.: Геохимические методы поисков в северных районах Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 108—112.
- Санин Б. П., Зорина Л. Д. Геология и геохимия Кличкинского рудного узла и прогноз оруденения.— Новосибирск: Наука, 1978.— 184 с.
- Ставров О. Д. Геохимические критерии формационного деления гранитов.— Докл. АН СССР, 1984, т. 260, № 1, с. 183—185.
- Таусон Л. В., Богатырев П. В., Гундобин Г. М. Эндогенные поля аномальных концентраций Хапчарангинского рудного узла.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск: Наука, 1978, с. 43—55.
- Таусон Л. В., Корнева А. Р. Этапы формирования эндогенных полей аномальных концентраций Бом-Горхонского рудного узла.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск: Наука, 1978, с. 21—43.
- Урунбаев К., Шарипов Т. Т., Айзенштат В. И. и др. Главные геохимические особенности магматических формаций Узбекистана.— В кн.: Магматические формации и фации Узбекистана. Ташкент: Фан, 1977, с. 278—311.
- Федорчук В. Г., Никифоров Н. А. Об использовании надрудного пирита в качестве индикатора при поисках низкотемпературных месторождений закрытого типа.— Разведка и охрана недр, 1958, № 5, с. 1—10.
- Филиппова Л. А. Потоки рассеяния рудных месторождений Хапчарангинского района (Восточное Забайкалье). Автореф. канд. дис.— Иркутск, 1977.— 24 с.

Р. И. ДУБОВ, Н. М. ФРАНКОВСКАЯ, В. К. КОШЕЛЕВ,
Б. А. ДОСАНОВА

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПРОГНОЗ ОРУДЕНЕНИЯ ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Математические преобразования геохимических данных представляют сведения о местонахождении полезных ископаемых, их типе и запасах. Эффективен метод, извлекающий из имеющихся данных при имеющихся средствах максимальную информацию. Следовательно, при разной изученности территории оптимальными оказываются разные методы обработки полученных на ней данных.

Назрела необходимость создания методов математической обработки данных, два из них рассматриваются ниже.

Для начальных этапов исследования территории и поиска месторождений неизвестных видов рекомендуется использовать комплексный показатель. Этот показатель рассчитывается для каждой точки геохимических, геофизических и других геологических наблюдений.

Пусть на изучаемой территории имеются данные наблюдений по n точкам и каждая точка характеризуется m признаками (например, концентрациями m химических элементов). Тогда перспективность на некоторый рудообразующий элемент (C_l) в i -й точке опробования определяется величиной комплексного показателя:

$$Q_{il} = \sum_{k=1}^m \left(\frac{r_{kl}^C}{\sum_{j=1}^m |r_{jk}|} \cdot \frac{u(C_{ik}) - \bar{u}(C_k)}{\sigma(u(C_k))} \right), \quad (1)$$

где u — нормализующая функция (например, $u(C_k) = \lg C_k$, если C_k — концентрация элемента, распределенного по логнормальному закону); $\sigma(u(C_k))$ — стандартное отклонение величин $u(C_k)$; $\bar{u}(C_k)$ — оценка средней величины $u(C_k)$; r_{ik} — коэффициент парной корреляции величин $u(C_k)$ и $u(C_j)$ элементов с номерами k и j ; r_{kl}^C — весовой коэффициент корреляции, который вычисляется по формуле:

$$r_{kl}^C = \frac{\sum_{i=1}^n C_{il} (u(C_{ik}) - \bar{u}(C_k)) \cdot u(C_{il}) - \bar{u}(C_l))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (u(C_{ik}) - \bar{u}(C_k))^2 \cdot \sum_{i=1}^n C_{il}^2 (u(C_{il}) - \bar{u}(C_l))^2}}. \quad (2)$$

Величины $\sigma(u(C_k))$, $\bar{u}(C_k)$, r_{jk} , r_{kl}^C вычисляются по данным наблюдений в n точках на исследуемой территории.

Полная относительная перспективность в i -й точке на совокупность рудообразующих элементов определяется выражением

$$Q_i = \sum_{l=1}^L Q_{il}, \quad (3)$$

где L — количество рудообразующих элементов.

Комплексный показатель отражает отличие значений нормализующих функций наблюденных величин от фоновых значений в долях стандартного (среднеквадратического) отклонения в многомерном пространстве признаков. Чем больше значение $(u(C_{ik}) - \bar{u}(C_k))/\sigma(u(C_k))$ в формуле (1), тем более редкой является величина C_{ik} . Величина $1/\sum_{j=1}^m |r_{jk}|$ в формуле (1) выражает значимость k -го элемента при прогнозировании: чем большее число элементов с ним коррелировано, тем меньше его значимость и рассматриваемая величина. Величина r_{kl}^C отражает связь k -го элемента с

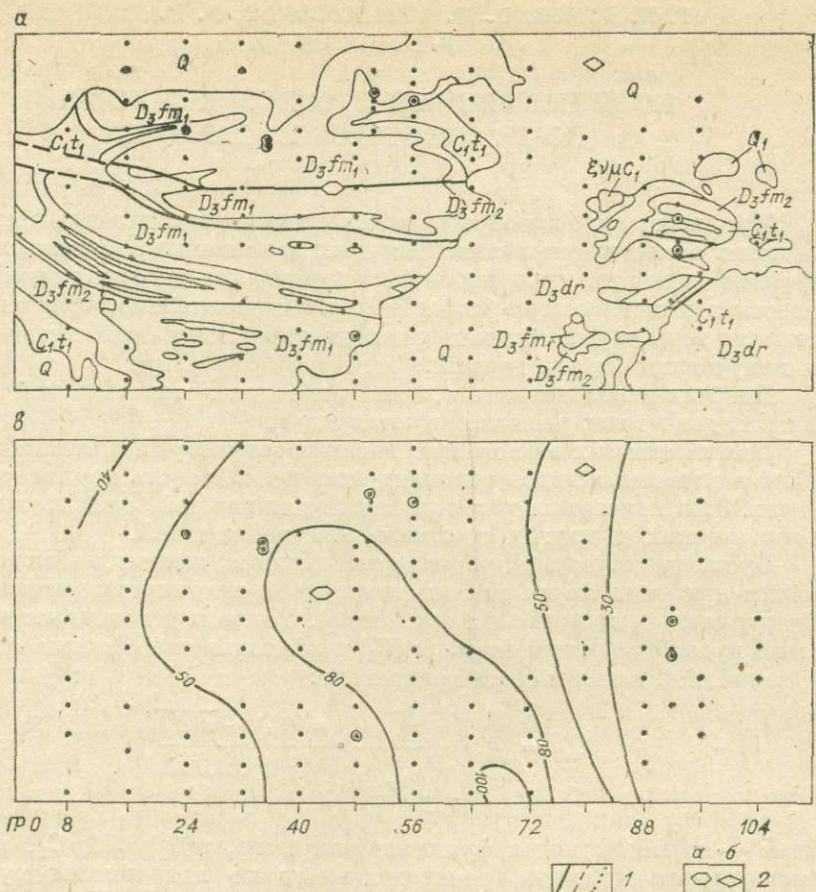


Рис. 1. Карты геохимических полей района
 а — схематическая геологическая карта; б — изоконцентраты ореолов свинца и цинка
 ции шумов. 1 — тектонические 'нарушения'; 2 — месторождения свинцово-цинковое
 ческой съемки и поисковые скважины; 4 — рекомендуемые площади
 проведения оце-
 непроведения интерпретации

относительно высокими концентрациями рудообразующего элемента. Учитывать эту связь необходимо, так как низкие концентрации рудообразующего элемента не представляют поискового интереса.

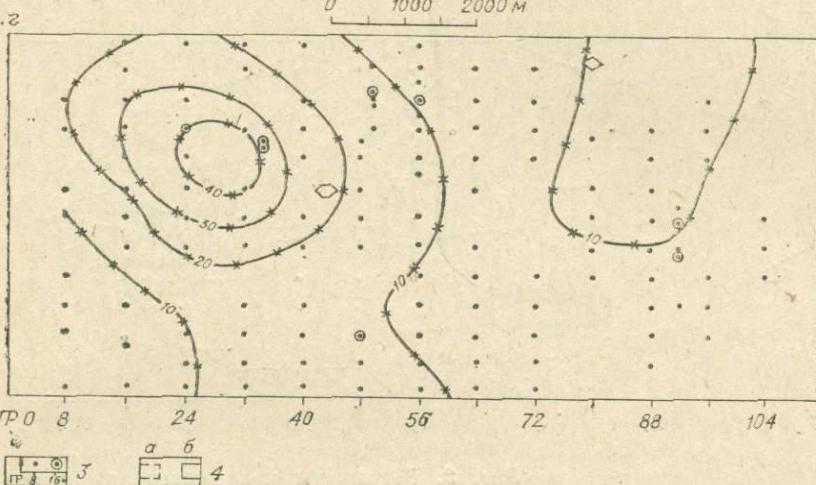
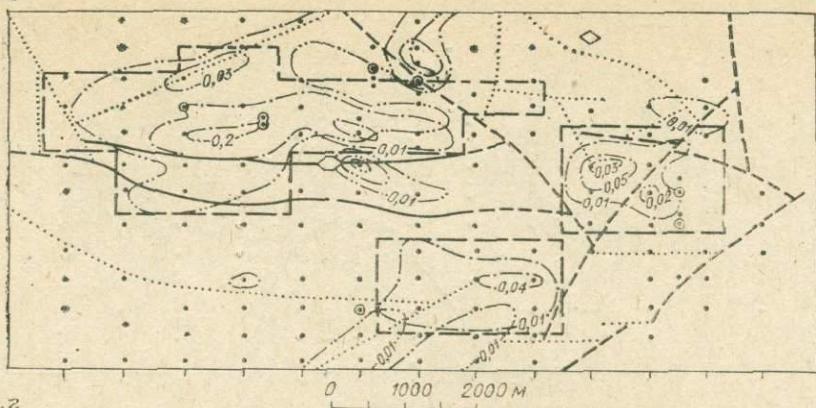
В выражение (1) можно также ввести дополнительное взвешивание элементов по экономической цене. Результаты расчетов представлены на карте линий равных значений показателя. Чем выше полученное значение, тем больше вероятные запасы руд, которые могут быть обнаружены под отмеченным этим показателем местом. В максимумах этих изображений указываются элементы в порядке уменьшения соответствующих им значений Q_i . Построенные таким образом ассоциации элементов имеют важное значение для геологических выводов и обоснования дальнейших исследований. При недостатке экономической информации дополнительное взвешивание по концентрации и цене может быть опущено.

Для уменьшения влияния помех (ошибок наблюдений, природных случайных флуктуаций состава геохимических проб) к полям каждого из рассматриваемых элементов применяется оптимальная аппроксимация [Дубов, 1974].

При вычислении комплексного показателя аналогично с концентрациями химических элементов C_k могут быть использованы геофизические и другие признаки, информативные при поисках месторождений.

На рис. 1 (а и б) показаны геологическая карта и карта эндогенных ореолов свинца и цинка, построенная по данным глубинной литохимической съемки. Как видим, здесь много аномалий, проверка которых

5



проявления свинцово-цинкового оруденения.

ка; *в*, *г* — карты изоконцентраций свинца (*в*) и цинка (*г*) после оптимальной фильтрации и железо-марганцевое (*б*); *з* — профили, точки отбора проб глубинной гидрохимических работ (*а* — до обработки данных на ЭВМ, *б* — по результатам комплексной на ЭВМ).

горными выработками по обычной методике потребовала бы значительных затрат. На рис. 1 (*в* и *г*) изображены те же поля, но после оптимизированного усреднения по упомянутой выше методике оптимальной аппроксимации. Теперь более уверенно прослеживаются области распространения свинца и цинка, отчетливо проявлены зональность распределения первичных ореолов этих элементов. Анализ зональности позволил предположить, что в северо-западной части следует ожидать существенно цинковые руды, а в центральной и юго-восточной возможны свинцово-баритовые руды. При съемках проводится вещественный анализ геохимических проб на 30—40 элементов. Интерпретация такого числа полей непосредственно человеком затруднительна и дает много ошибок.

Предложенный метод построения комплексных полей представляет собой удобный способ сжатия информации. На рис. 2 (*а*) показано выделенное по этому способу комплексное поле. Вычисление комплексных показателей проводилось без ориентации на какой-либо тип оруденения и без взвешивания по концентрации и цене. Поэтому на карте изолиний комплексного показателя отмечаются участки без конкретизации типа оруденения. В результате выделено четыре крупные зоны.

После выделения по таким изображениям участков можно, в случае необходимости, вернуться вновь к изображениям полей отдельных элементов для расшифровки комплексных аномалий. Теперь это требует просмотра материала во много раз меньшего, чем это было бы без комплексных построений. Такой анализ выделенных участков позволил оценить

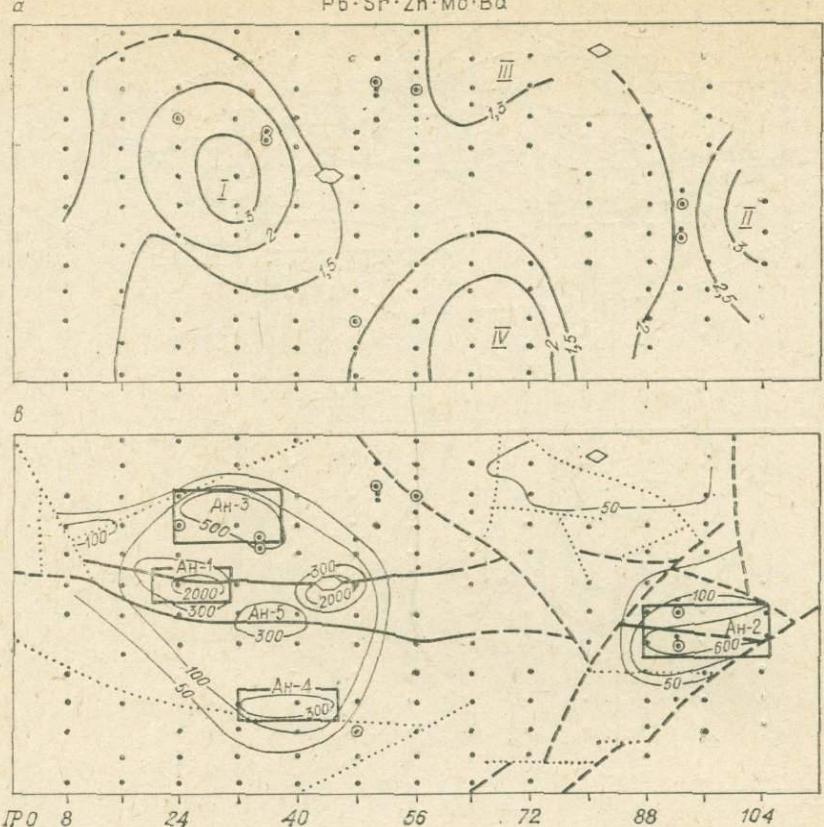


Рис. 2. Результаты количественного прогно-
за, а, б — изоконцентраты комплексных геохимических аномалий; в — изоконцентраты
прогнозных глубин до центров тяжести рудных тел.

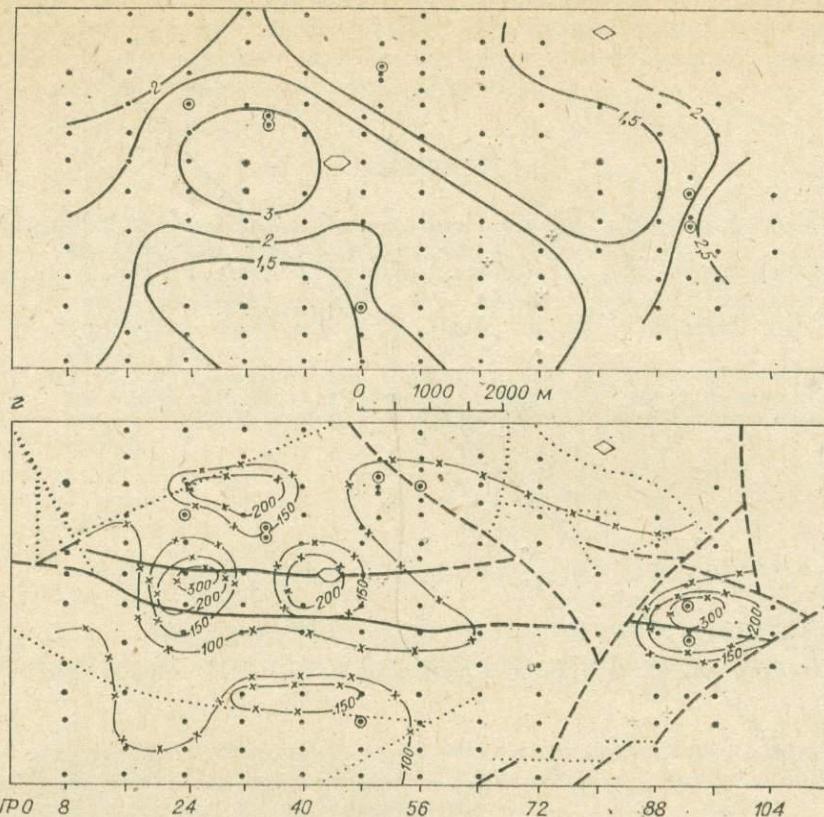
зоны I и II как перспективные на свинцово-цинковое оруденение, зону III — на железо-баритовое, зону IV — как глубоко эродированное свинцово-цинковое оруденение.

Имеется много материалов, где видно, что такие комплексные поля не только упрощают выделение перспективных участков, но также дополнительно уменьшают влияние разнообразных помех, шумов.

Описанный метод позволяет единообразно обрабатывать данные по большим территориям, беря в расчет большое количество элементов без значительного риска увеличения влияния шумов. Это видно, в частности, на рис. 2. Здесь (а) показано построение комплексного поля по пяти элементам (свинец, цинк, стронций, молибден, барий), ореолы которых, как установлено, отображают имеющиеся на этой площади рудные тела. На рис. 2 (б) представлено комплексное поле, построенное при включении в расчет большого числа элементов, ореолы которых в меньшей степени отражают наличие рудных тел (серебро, сурьма, медь, кобальт, марганец). Это связано с тем, что в описанном методе автоматически оцениваются и учитываются закономерности распределения каждого из элементов.

На приведенных рисунках показана упрощенная, но довольно типичная картина. Первичные данные для нее получены при обработке геохимических данных.

Как указывалось, метод может быть применен в новых условиях, когда отсутствует обучающий материал. Если же ведется поиск месторождений, имеющих хотя бы частично общие черты с уже изученными, т. е. при наличии обучающего материала, из геохимических данных может быть извлечена гораздо большая полезная информация.



зирования свинцово-цинкового оруденения.

прогнозных удельных производственных свинца и цинка; γ — изоконцентраты I — IV — рудные участки. Другие усл. обозн. см. на рис. 1.

Для этого используется оптимизированная регрессия запасов руды на геохимические, геофизические и другие геологические признаки, наблюдаемые на поверхности земли или на малой глубине. Эта регрессия основана на упоминавшемся методе оптимальной аппроксимации и последовательной схеме включения признаков в уравнение регрессии [Дубов и др., 1977; Дубов, 1979].

Построение обычной регрессии заменено последовательным построением нескольких оптимизированных функций с автоматическим выбором не только оптимальных значений параметров, но и оптимального порядка и вида функции, т. е. оптимальной математической модели. Кроме того, автоматически упорядочивается ввод признаков в регрессию в зависимости от их информативности. Алгоритм вычислений реализован на ЭВМ.

Указанный метод позволяет, используя геохимические данные, прогнозировать удельные запасы, т. е. оценить количество руды, находящейся под каждым квадратным метром исследованной территории. Получаемые карты удельных запасов отображают в виде изолиний проекцию месторождения на поверхность опробования в направлении движения рудообразующего вещества.

Функции регрессии, получаемые по обучающему материалу, могут быть довольно сложными. Для их использования при поисках новых месторождений желательно применять электронные вычислительные машины. Но возможно также представление этих функций в виде палеток (палеток).

Точность прогноза описанным методом иллюстрируется на рис. 3. Координатами показанных здесь точек являются оценки удельных запас-

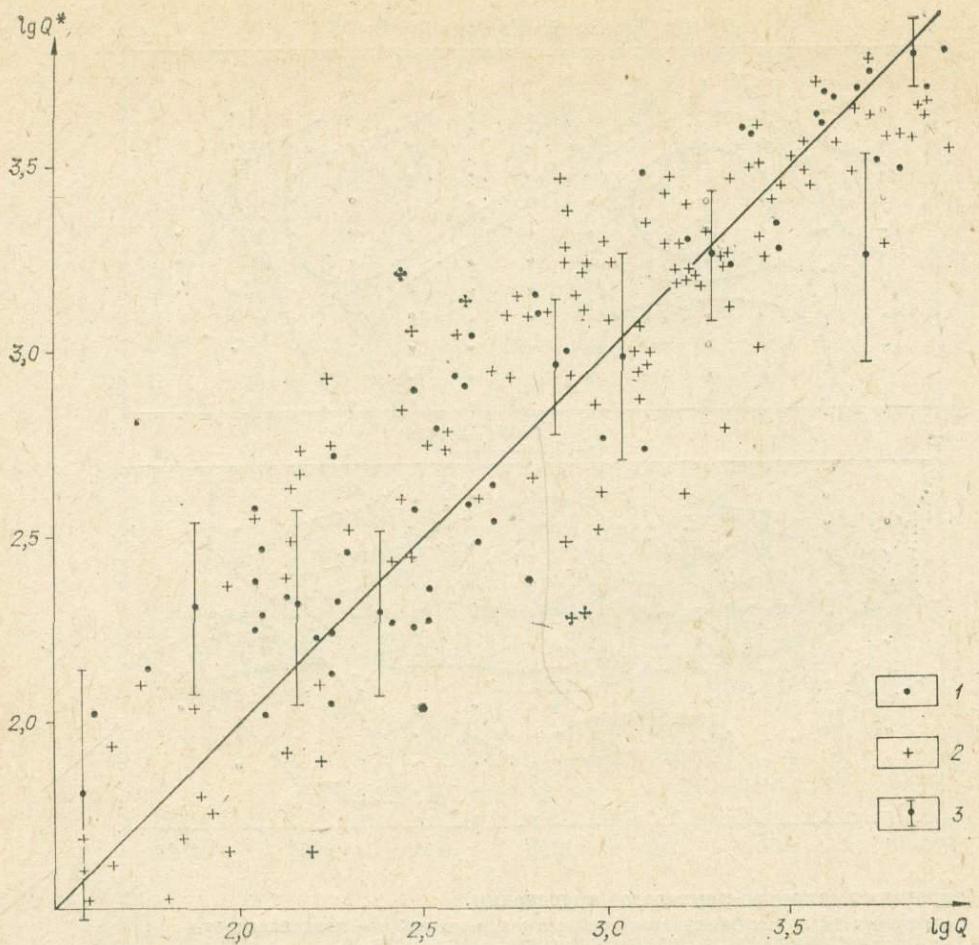


Рис. 3. Сопоставление удельных запасов меди, полученных с использованием регрессии (Q^*) и фактических по разрезу (Q).

1, 2 — объекты: 1 — материала обучения, 2 — материала распознавания; 3 — интервал средних ожидаемых относительных отклонений оценок Q^* от истинных.

сов руд, вычисленных по этому методу, и соответствующие им величины, полученные по результатам исследований. Как видим, эти точки группируются около жирной прямой линии, отображающей прямую пропорциональность между названными оценками и действительными удельными запасами. Подсчет показал, что оценки удельной продуктивности, делаемые с помощью описанного метода по наблюдениям в отдельных точках, отличаются от вычисленных по геологическим разрезам менее чем в 3 раза. Это различие сопоставимо с различием результатов повторного бурения. По оценкам удельных запасов в определенных контурах могут быть оценены суммарные запасы месторождения. Они отличаются от вычисленных по данным разведки в среднем в 1,7 раза. Пример такой карты — карты удельных запасов суммы свинца и цинка в виде изолиний — на рис. 2 (б). Здесь отражены уже известное месторождение и предполагаемое скопление руд.

Аналогично оценивается глубина залегания центра тяжести оруденения. На рис. 2 (г) показана в изолиниях карта таких глубин. Сопоставление карт прогнозных удельных запасов и глубин залегания их центров тяжести позволяет лучше планировать последующие детализационные работы.

Таким образом, описанный метод позволяет предсказывать по геохимическим данным (желательно в сочетании с геофизическими и другими

геологическими наблюдениями) не только наличие, но и масштабы оруденения и положение его на глубине. Прогнозные оценки по разным химическим элементам дают возможность учесть состав руд и их экономическую значимость (включая элементы-примеси).

ЛИТЕРАТУРА

- Дубов Р. И. Количествоные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений.— Новосибирск: Наука, 1974.— 277 с.
- Дубов Р. И. Количествоный прогноз оруденения по разнородным данным.— В кн.: Sborník prednásek se matematické metody v geologii. Symposium pracovníků bánskeho průmyslu «Hornická príbram ve vede a technice» (Chechoslovakia), 1979, p. 227—238.
- Дубов Р. И., Франковская Н. М., Кошелев В. К. и др. Автоматическая количественная интерпретация геохимических данных.— В кн.: применение автоматизированных систем и ЭВМ при геохимических исследованиях. Алма-Ата, 1977, с. 3—5.

И. И. ТАРЛИНСКИЙ, С. Г. ПЕТРОВСКАЯ, А. М. СПИРИДОНОВ

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПРОГНОЗ ОРУДЕНЕНИЯ МЕТОДОМ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Интерпретация наблюдавшихся геохимических полей с помощью современных математических методов и ЭВМ открыла новые возможности для прогнозирования слепых рудных тел.

По данным геологических, геохимических и геофизических признаков перспективность разведуемой площади зачастую характеризуется качественными показателями. Очевидно, что более предпочтительно получить количественную информацию о перспективности рудной зоны и распределении в ней полезных компонентов.

С этой целью формулируется и исследуется математическая модель природного процесса рудообразования, служащая инструментом решения обратной задачи, определяются параметрические показатели, описывающие морфологию рудного тела, которые используются затем в практических приложениях.

Рассмотрим физико-математическую модель формирования рудного тела и его первичного ореола для одного из типов гидротермальных месторождений.

Предположим, что в ослабленную системой микротрешин крутопадающую зону из глубинного источника поступает рудоносный раствор, причем взаимодействие каждого из компонентов раствора с другими компонентами и с вмещающими породами происходит независимо, что справедливо для ненасыщенных по рудным компонентам растворов.

Уравнение процесса фильтрационного массопереноса в одномерной системе координат (ось x направлена вдоль оси глубин) записывается в виде

$$d_t m_{jk} = U \cdot C_{jk} \cdot dS \cdot dt. \quad (1)$$

Здесь $d_t m_{jk}$ — количество вещества, проходящее за время dt через единичную площадку dS ; $C_{jk} = C_{jk}(x, t)$ — концентрация этого вещества в жидкой фазе на площадке dS в момент t от начала процесса; U — линейная скорость потока.

На некоторой глубине x_n от земной поверхности в силу изменения термодинамических или физико-химических условий раствор становится неустойчивым и из него начинают выпадать в твердую фазу те или иные

компоненты в форме, характерной для данной обстановки минеральных образований. Будем считать, что процесс накопления твердой фазы описывается необратимой химической реакцией первого порядка, как наиболее типичной кинетической реакцией рудоотложения, и может быть выражен так:

$$d_t C_{\text{ж}} = -\kappa \cdot C_{\text{ж}} \cdot dt, \quad (2)$$

где κ — константа скорости реакции.

Константа κ скорости химической реакции раствора со средой зависит от изменяющихся с глубиной термодинамических параметров вмещающих пород. По результатам аппроксимации концентрационных профилей элементов на разных месторождениях получена формула:

$$\kappa(x_n) = G^*(x_n) \cdot (x_n - x)^{n(x_n)}, \quad (3)$$

где x_n — точка инверсии, разделяющая области устойчивого и неустойчивого равновесия гидротермальных растворов; $x < x_n$ — глубина, отсчитываемая от поверхности земли; $G^*(x_n)$, $n(x_n)$ — некоторые функции. Данные функции характеризуют динамику изменения с глубиной физических свойств вмещающей породы. Вид функций $G^*(x_n)$ и $n(x_n)$ определяется при интерпретации концентрационных профилей элементов.

Изменение концентрации твердой фазы за единицу времени записывается уравнением:

$$d_t C_{\text{т}} = -\frac{\beta}{1-\beta} \cdot d_t C_{\text{ж}}, \quad (4)$$

здесь β — пористость горной породы.

Применение принципов композиционного моделирования [Дубов, 1974]* при реализации выражений (1), (2), (4) в итерационном вычислительном процессе позволило создать дискретный аналог модели формирования рудного тела и его первичного ореола. Данная модель положена в основу разработанных программных средств, используемых в целях интерпретации распределения элементов в рудной зоне и прогнозирования оруденения на глубину.

Известно, что процесс количественной интерпретации результатов наблюдений геохимического поля неразрывно связан со свертыванием исходной информации. В связи с этим количественным построениям предшествует процедура математической обработки результатов геохимической съемки полей концентраций по разрезам.

При построении полей по разрезам возникает задача отображения составляющих, обусловленных изучаемыми процессами. Кроме них геохимическое поле имеет неоднородности, линейные размеры которых малы по сравнению с размерами геохимических проб и расстояниями между ними. Они проявляются как высокочастотная составляющая поля. К этим помехам добавляются шумы, связанные с инструментальными ошибками. Поэтому при решении обратной задачи необходимо иметь данные после подавления таких шумов, считая остальные сигналы полезными. Для подавления шумов нами использовался алгоритм оптимизированного усреднения.

После построения полей концентрации на геологических разрезах проводятся линии, проходящие через рудную зону по главному направлению переноса рудообразующего вещества, и по пересечениям их с изолиниями концентраций строятся графики содержаний элементов.

Количественной интерпретации подвергаются концентрационные профили элементов, характеризующиеся совокупностью точек наблюдений над- и подрудного ореолов, и зоны максимальных концентраций, что позволяет достаточно надежно идентифицировать модель и оценить ее пара-

* Дубов Р. И. Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений.— Новосибирск: Наука, 1974.— 278 с.

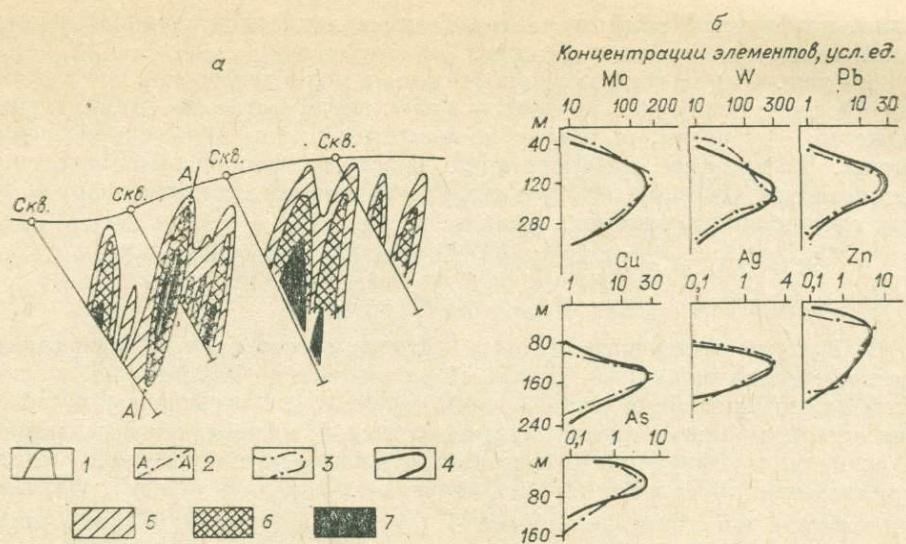


Рис. 1. Эндогенные ореолы молибдена (а) и концентрационные профили элементов вдоль направления АА (б) (северный участок месторождения).

1 — изолинии концентраций Mo; 2 — предполагаемая линия переноса вещества при рудообразовании; 3 — наблюдаемое распределение элементов по глубине; 4 — аппроксимирующие функции; 5—7 — содержания Mo от низких к высоким.

метры. Найденная аппроксимирующая функция представляет собой материал обучения, необходимый для решения более сложной прогнозной задачи.

Предлагаемая методика прогнозирования оруденения на глубину предусматривает наличие в качестве априорной информации данных геохимического опробования надрудного ореола или его фрагмента и сводится к варьированию свободных параметров аппроксимирующей конструкции до удовлетворения критерию аппроксимации. Полученные в результате решения обратной задачи параметры физико-математической модели количественно характеризуют прогнозируемый на глубину концентрационный профиль изучаемого компонента.

В качестве примера, иллюстрирующего описанную выше методику, выбрано месторождение, представляющее собой штокверкоподобную рудную зону. В северном направлении мощность штокверка постепенно уменьшается до выклинивания, в южном — обрывается довольно резко. В пределах штокверка выделяются два участка концентрирования оруденения — северный и южный. Значительное влияние на локализацию оруденения оказали физико-механические свойства вмещающих пород. Наибольшая часть рудных тел приурочена к порфиритам и располагается в надкупольных частях тел гранит-порфиров. Морфология минерализованной зоны определяется главным образом формой и размерами тел

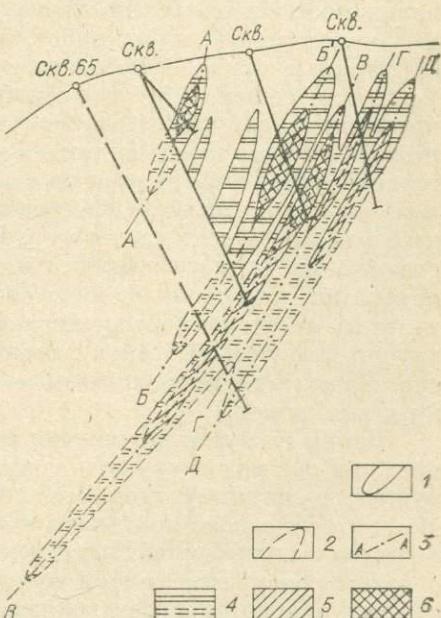


Рис. 2. Эндогенные ореолы молибдена (южный участок).

1 — изолинии концентраций Mo; 2 — прогнозируемые изоконцентраты; 3 — направления миграции рудного вещества; 4—6 — содержания Mo от низких к высоким, усл. ед.

гранит-порфиров. Молибденовое оруденение локализуется в основном в эзоконтакте тел гранит-порфиров.

На рис. 1 приведены первичные ореолы молибдена и концентрационные профили некоторых элементов вдоль предполагаемого направления движения гидротерм, а также аппроксимирующие эти распределения кривые. В процессе интерпретации пространственного распределения элементов для функций $G^*(x_n)$ и $n(x_n)$ на изучаемом месторождении получены следующие выражения:

$$\lg G^*(x_n) = -4,6 - 3,9 \lg x_n + 1,4(\lg x_n)^2 - 0,18(\lg x_n)^3,$$
$$n(x_n) = \text{const} = 3.$$

Найденные аппроксимирующие функции позволяют осуществить прогноз концентрационных профилей молибдена на глубину по результатам наблюдений надрудных первичных ореолов. С этой целью произведена оценка южного участка изучаемого месторождения, осуществляемая на основании априорной информации о физико-математической модели формирования оруденения и ее параметрах на северном участке. Обучающая выборка дополнена функциями $C_A^*(x)$ и $C_B^*(x)$ (рис. 2), найдены параметры функций $C_V^*(x)$; $C_\Gamma^*(x)$, $C_D^*(x)$, после чего оказалось возможным перейти к построению изолиний прогнозных значений концентраций Mo. Высокая достоверность выполненного прогноза подтверждена результатами опробования скв. 65, не использовавшимися в математических построениях. Кроме того, положение нижней границы оруденения ($x_n = 770$ м) согласуется с данными структурно-геологических и минералого-геохимических исследований.

Ю. Г. ШЕСТАКОВ, С. И. ЛЕОНТЬЕВ

О ВОЗМОЖНОМ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ РУДНЫХ ПОЛЕЙ

Выявление средних и мелких объектов в пределах рудных полей должно обеспечиваться не только за счет наращивания объемов проводимых поисково-оценочных работ, но и за счет переоценки имеющейся информации с привлечением закономерностей формирования оруденения, устанавливаемых в процессе отработки известных месторождений. Данные крупномасштабных литохимических съемок и построенные на их основе моноэлементные карты являются неотъемлемой составной частью геолого-геохимической информации по известным рудным полям различных видов полезных ископаемых. Непосредственное использование имеющихся данных с целью поиска слепого оруденения осложнено по той причине, что содержания рудного элемента над глубокозалегающими и перекрытыми объектами, как правило, мало отличаются от фоновых, а имеющиеся результаты спектрального анализа отвечают существовавшему ранее уровню научно-технической базы и характеризуются определенной разрешающей способностью по выявлению полезного сигнала на фоне природных и технических помех.

Одним из путей повышения информативности геохимических данных прежних лет может служить совместный учет слабых полезных сигналов рудного и сопутствующих ему элементов, причем учет этот может обеспечиваться на основе получения комплексных показателей. Формирование комплексных показателей, по нашему мнению, должно учитывать интегральные проявления слабых сигналов аномальности участвующих в оруденении элементов и централизованные и нормированные величины со-

держаний, т. е. коэффициенты контрастности. В качестве возможных предлагались следующие показатели [Шестаков, 1979]:

$$1. \gamma_i = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\ln C_i^j - \overline{\lg C^j}}{S^j \lg C} \right)^2,$$

при учете значений $(\lg C_i^j - \overline{\lg C^j}) > 0$, где $\lg C_i^j$ — содержание j -го элемента в i -й точке; $\overline{\lg C^j}$ — среднее геометрическое содержание j -го элемента; $S^j \lg C$ — среднее квадратическое содержание этого элемента ($i = 1, 2, \dots, n$ — число наблюдений на профиле или в пределах площади, а $j = 1, 2, \dots, m$ — число комплексируемых элементов). Если $\gamma_i > \chi_{\alpha}^2(m)$, где α — уровень значимости проверяемой гипотезы об аномальности изучаемой точки, m — число степеней свободы (равно числу учитываемых признаков), то полученное значение комплексного показателя аномально (значения $\chi_{\alpha}^2(m)$ — табулированы и приводятся в руководствах по теории вероятности и математической статистике).

$$2. \gamma_i = \sum_{j=1}^m \left| \frac{\lg C_i^j - \overline{\lg C^j}}{S^j \lg C} \right|^2,$$

при учете значений $(\lg C_i^j - \overline{\lg C^j})$ как больше, так и меньше ноля.

$$3. \gamma_i = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\lg C_i^j - \overline{\lg C^j}}{S^j \lg C} \right)^2 - \sum_{k=1}^l \left(\frac{\lg C_i^k - \overline{\lg C^j}}{S^k \lg C} \right)^2,$$

при учете m признаков, значения $(\lg C_i^j - \overline{\lg C^j}) > 0$ которых являются полезным сигналом искомого оруденения и l признаков, значения $(\lg C_i^k - \overline{\lg C^k}) > 0$ которых являются отрицательными (запрещенными) для выявления оруденения. Аномальность оцениваемой точки при использовании этого показателя определяется при числе степеней свободы, равном $m + l - 1$.

Получение подобных показателей не составляет труда в любом геологическом подразделении, вычислительный центр которого может обеспечить хранение упорядоченной в пространстве информации. Положительным фактором формирования комплексных показателей на основе учета центрированных и нормированных величин является то, что в качестве комплексируемых признаков может быть использована разнородная информация (элементы с различным порядком содержаний, значения физических полей, количественные характеристики околосрудного изменения вмещающих пород и т. п.), т. е. переинтерпретация геохимических данных прежних лет может вестись с учетом закономерностей оруденения, установленных при изучении эталонного объекта рудного поля.

В статье освещаются результаты использования показателя первой модификации для выявления участков возможного распространения слепого оруденения в пределах одного из золоторудных полей.

Рельеф изученной местности расчлененный, рыхлый покров имеет мощность от долей метра до десятков. Обработка данных (более 39 000 проб с учетом содержаний 6 элементов) осуществлена на основе математического обеспечения первой очереди АСОД-Геохимия ПГО «Красноярскгеология» [Шестаков, Юрьевич, 1979]. Значения комплексного показателя в виде карт изолиний отстраивались графопостроителем ЭПВМ «Минск-32». Попутно получались карты усредненных значений комплексируемых признаков (масштаб карт — 1 : 25 000; 1 : 10 000; 1 : 5000).

Основанием для предложения о возможном наличии в пределах изучаемого рудного поля слепого оруденения и о возможном его обнаружении с помощью комплексного показателя послужило следующее.

1. Выявление золотоносных жил в пределах изучаемой площади осуществлялось на основе находок свалов кварца, а так как часть площади

Значения парных коэффициентов корреляции для логарифмов ряда элементов в рыхлых элювиально-делювиальных отложениях над эталонным объектом по данным обработки материалов литохимической съемки прошлых лет

Элемент					Элемент
Медь	Цинк	Серебро	Мышьяк	Золото	
0,77	0,49	0,46	0,65	0,50	Свинец
0,04	0,08	0,08	0,06	0,08	
I	0,54	0,45	0,62	0,40	
	0,07	0,08	0,06	0,09	
I	0,32	0,29	0,41	0,09	
	0,09	0,09	0,09	0,09	
I	0,62	0,30	0,30	0,09	Медь
	0,06	0,06	0,09	0,09	Цинк
I	0,47	0,47	0,47	0,08	Серебро
	0,08	0,08	0,08	0,08	Мышьяк

П р и м е ч а н и е. Числитель — оценка коэффициента корреляции, знаменатель — ошибка его определения.

имеет рыхлый покров значительной мощности, то возможны пропуски перекрытых объектов. Жилы же, вскрывающиеся своей верхней частью, вообще не могли создать ярко выраженных свалов кварца.

2. Золотоносные жилы сопровождаются наличием в рыхлых элювиально-делювиальных отложениях повышенных содержаний свинца, меди, цинка, серебра, мышьяка, золота и др.

Резкое уменьшение числа жил приходится на отметки рельефа меньше 1200 м, с которых в указанном районе начинается обильная растительность и, естественно, осложняется выделение жил по свалам кварца.

Утверждение геологов о наличии повышенных содержаний над золотоносными жилами ряда элементов проверено статистической обработкой данных литохимии прошлых лет. Обрабатывались результаты опробования рыхлых элювиально-делювиальных отложений, развитых над эталонным объектом. В таблице приведены оценки коэффициентов корреляции между логарифмами содержаний золота и сопутствующих элементов. Данные таблицы позволяют сделать заключение о наличии значительных связей элементов с золотом и между собой. Обработка данных специально проведенного опробования руд эталонного объекта (175 проб) подтвердила наличие в них связей между перечисленными элементами. Оценка коэффициентов корреляции логарифмов их содержаний с логарифмами содержаний золота лежат в пределах 0,43—0,68, достигая 0,8 и более для пар свинец — цинк, свинец — серебро, серебро — цинк.

Большинство из перечисленных элементов-спутников находится в рудах и рыхлых отложениях над ними в содержаниях значительно больших, чем сам рудный элемент, и, главное, характеризуются лучшей воспроизводимостью при спектральном анализе, что и позволяет использовать их при построении комплексного показателя для поиска слепого оруденения.

На рис. 1 в качестве примера приведены изолинии повышенных содержаний комплекса сопутствующих оруденению элементов, по данным исследователей, и изолинии усредненных значений содержаний, полученные с помощью скользящего окна.

В разряд повышенных (аномальных) исследователями относились содержания меди, цинка и мышьяка, равные и большие 0,007%; свинца — 0,005; серебра — 0,01%.

Изолинии усредненных значений содержания сопутствующих элементов, совпадая в основном с участками повышенных содержаний, выделенных на основе частных определений, слабо отражают известные в пределах участка кварцевые жилы. В то же время анализ фактических материалов

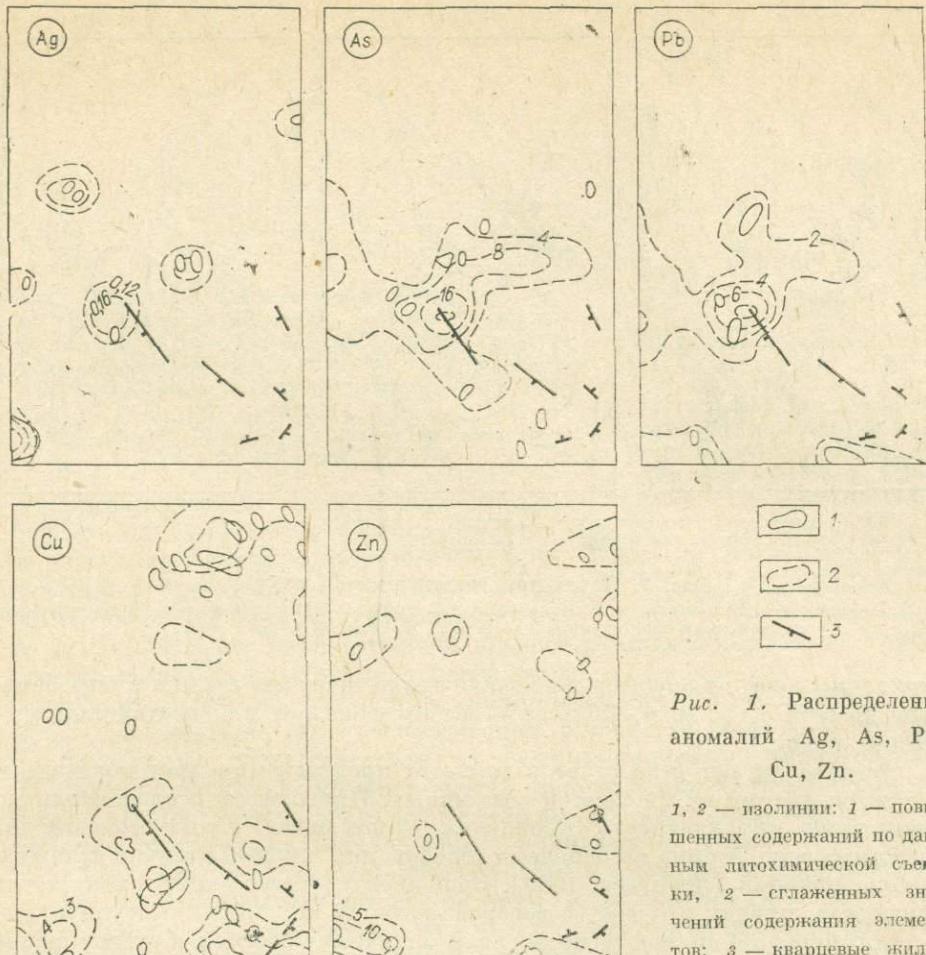


Рис. 1. Распределение аномалий Ag, As, Pb, Cu, Zn.

1, 2 — изолинии: 1 — повышенных содержаний по данным ликохимической съемки, 2 — сглаженных значений содержания элементов; 3 — кварцевые жилы.

карт-разносок показывает, что жилы сопровождаются слабыми повышенными содержаниями сопутствующих элементов, фиксирующимися в виде узких полос и цепочек точек, часто смещенными по склону. Они достигают контрастности, требуемой инструкцией [Инструкция..., 1965], и затушевываются в процессе сглаживания.

На рис. 2 (а) приведены изолинии значений комплексного показателя (градации 1; 5; 10; 20; 40) и показан (б) контур аномалий комплексного показателя, в который укладывается большинство жил участка и который свидетельствует о возможном значительном продолжении зоны, вмещающей основные жилы участка, в СЗ направлении. О возможном наличии здесь неизвестных жил свидетельствуют и данные спектрохимической съемки на золото, выполненной авторами по опорным профилям (см. рис. 2, б).

На рис. 2 (б) показаны изолинии сглаженных значений комплексного показателя с радиусом усреднения в 1,0 см масштаба карты. Значения изолиний (8; 16) при имеющемся числе комплексируемых элементов соответствуют отнесению изучаемых участков территории в разряд аномальных с вероятностями соответственно 0,8; 0,99. Получение карт осредненных значений с большим размером скользящего окна имело целью выделение в пределах всего рудного поля участков, благоприятных на обнаружение золотого оруденения. Всего в пределах изучаемого поля получено 36 аномальных зон, подобных показанной на рис. 2 (б), причем часть их пришлась на участки, где жилы не установлены. Пересечение зон профильной спектрохимической съемкой подтверждает наличие в некоторых повышенных содержаний золота. На основании этого с 1982 г. в пределах

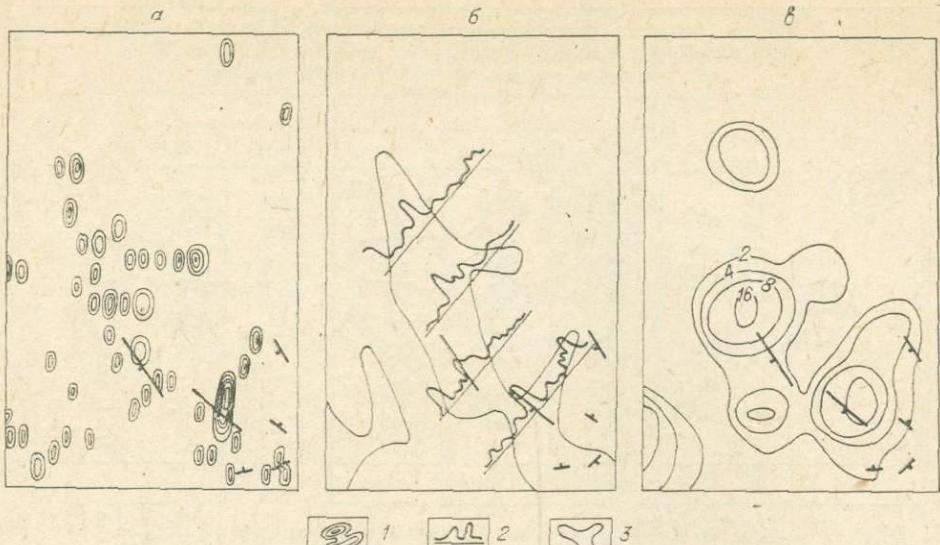


Рис. 2. Параметры геохимической съемки.

1 — изолинии значений комплексного показателя; 2 — кривые содержаний золота по данным спектрохимической съемки; 3 — контур возможной рудной зоны.

апомальных зон проводится детальная геохимическая съемка с опробованием по сети 50×10 м. Цель ее — выбор участков для постановки оценочных работ.

Авторы отдают себе отчет в том, что предлагаемые ими показатели являются одними из множества возможных. Проводятся исследования по повышению объективности выделения с помощью таких показателей известных жил района на основе использования предварительно слаженных содержаний [Леонтьев, 1980]. Возможен учет веса комплексируемых признаков, причем в качестве весовой функции могли бы выступать значения отношений оценок тесноты связи элемента с золотом к сумме оценок всех комплексируемых. Бессспорно одно, что использование подобных показателей дает положительный эффект при пересмотре геохимических данных прежних лет.

ЛИТЕРАТУРА

- Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. — М.: Недра, 1965. — 227 с.
- Леонтьев С. И. К вопросу обработки данных литогеохимии. — В кн.: Новые данные по геологии и полезным ископаемым Красноярского края и Тувинской АССР (тезисы докладов). Красноярск, 1980, с. 54—55.
- Шестаков Ю. Г. К вопросу выявления слабых ореолов рассеяния при литохимических поисках. — В кн.: Symposium Methods of Geochemical Prospecting, Volume I — Abstracts, pt II. Ostrava, Czechoslovakia, 1979, с. 166—167.
- Шестаков Ю. Г., Юркевич Л. Г. К вопросу поисков месторождений на основе постановки карт комплексных геохимических показателей. — В кн.: Геохимические карты и их использование при поисках рудных месторождений (тезисы докладов). Ч. I. Хабаровск, 1979, с. 112—113.

А. И. БУРАГО, А. Н. ИВАКИН

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПРОГНОЗ ОРУДЕНЕНИЯ ПО ПЕРВИЧНЫМ ЛИТОХИМИЧЕСКИМ ОРЕОЛАМ

Потенциальные возможности количественного прогнозирования рудных объектов по их первичным ореолам достаточно велики. Весьма перспективно для этих целей использование геохимических статистических

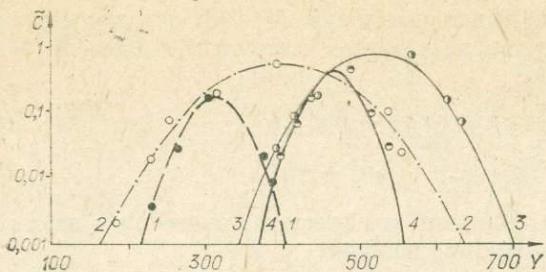


Рис. 1. Пример аппроксимации функциями типа (1)–(3) распределения содержания олова (в усл. ед.) в направлении произвольно выбранного горизонтального вектора (ось Y) на одном из оловорудных месторождений штокверкового типа

Графики 1 и 4 характеризуют фланги штокверка, а 2 и 3 — его центральную часть.

детерминированных моделей, которые отражают наиболее существенные закономерности изменения характеристик оруденения в пространстве и обладают большими возможностями для разработки на их основе методов количественной оценки рудных объектов на глубину по результатам их изучения с поверхности.

Эмпирически на различных месторождениях и проявлениях Приморья установлено, что распределение рудных элементов в пределах каждого из них носит статистически детерминированный характер, когда наряду с направленными изменениями концентрации химических элементов от центра объекта к его периферии имеют место многочисленные локальные отклонения, обусловленные влиянием большого числа случайных факторов. Для учета таких случайных отклонений необходимо использовать аппарат теории вероятности и математической статистики. Составленная на этой основе модель будет эмпирической математической статистически детерминированной геохимической моделью оруденения. Такие модели получены нами для оловянных, оловянно-полиметаллических, полиметаллических, вольфрамовых и других рудных объектов Приморья. Сведения по геологии и геохимии изученных объектов опубликованы ранее [Ивакин, Антонов, 1967; Иванов и др., 1971; Ивакин и др., 1972; Бураго, 1978; Бураго, Чуланов, 1978].

В результате проведенных исследований на большом фактическом материале (более 100 тыс. проб) показано, что распределение содержания основных ореолообразующих элементов по осям X , Y , Z вполне удовлетворительно описывается квадратной экспонентой вида

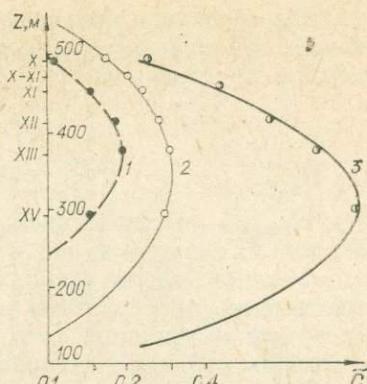


Рис. 2. Пример аппроксимации функцией (3) распределения олова вдоль осевого вектора (Z) на одном из оловорудных месторождений штокверкового типа.

1 — среднее содержание олова по горизонту в целом; 2 — то же, на площадку 100×100 м; 3 — площадная продуктивность по горизонтам (обозначены римскими цифрами).

$$C_{ji} = C_{jmx} \exp(\alpha_j x_i^2), \quad (1)$$

$$C_{ji} = C_{jmy} \exp(\beta_j y_i^2), \quad (2)$$

$$C_{ji} = C_{jmz} \exp(\gamma_j z_i^2), \quad (3)$$

($|\alpha_j|$, $|\beta_j|$, $|\gamma_j|$) $\ll 1$, где C_{ji} — содержание j -го химического элемента в i -й пробе*; C_{jmx} , C_{jmy} , C_{jmz} — максимальное содержание химического элемента по соответствующей оси; α_j , β_j , γ_j — числовые коэффициенты; x_i , y_i , z_i — координаты i -й точки.

Графики функций (1)–(3), аппроксимирующие фактическое распределение химических элементов на некоторых рудных объектах Приморья, показаны на рис. 1, 2.

* Здесь и далее в приводимых уравнениях рассматривается содержание химических элементов за вычетом фона, т. е. $C_{ii} = C_{\text{общ } ii} - C_{\text{фон } i}$.

На основании приведенных выше уравнений (1)–(3) получены уравнения, описывающие распределение химических элементов в двух- и трехмерном пространстве:

$$C_{ji} = C_{jmxy} \exp(\alpha_j x_i^2 + \beta_j y_i^2), \quad (4)$$

$$C_{ji} = C_{jm} \exp(\alpha_j x_i^2 + \beta_j y_i^2 + \gamma_j z_i^2), \quad (5)$$

где C_{jmxy} — максимальное содержание химического элемента на плоскости XY ; C_{jm} — то же в центре оруденения.

Установленную закономерность распределения рудного вещества в трехмерном пространстве можно сформулировать следующим образом: логарифм содержания того или иного химического элемента изменяется в стороны от центра минерализации (оруденения) обратно пропорционально квадрату расстояния от него.

Используя уравнения (4) и (5), можно получить:

$$C_{ji} = C_{jm} \exp(A_j x_i^2 + B_j y_i^2 + E_j x_i y_i + N_j x_i + R_j y_i), \quad (6)$$

$$C_{ji} = C_{jm} \exp(A_j x_i^2 + B_j y_i^2 + D_j z_i^2 + E_j x_i y_i + F_j x_i z_i + K_j y_i z_i + N_j x_i + R_j y_i + Q_j z_i), \quad (7)$$

$$M_{ji} = \bar{C}_{ji} L = M_{jm} \exp(\alpha_j x_i^2 + b_j y_i^2 + f_j x_i y_i + n_j x_i + \gamma_j y_i), \quad L = \text{const}, \quad (8)$$

$$P_{ji} = \bar{C}_{ji} S = P_{jm} \exp(\delta_j y_i^2), \quad S = \text{const}, \quad (9)$$

$$P_{ji} = \bar{C}_{ji} S_{ji} = P_{jm} \exp(\lambda_j y_i^2) - \tau_j C_{ji} (1 - P_{jm}), \quad (10)$$

$$v_i = v_0 \exp(\Delta A x_i^2 + \Delta B y_i^2 + \Delta F x_i y_i + \Delta N x_i + \Delta R y_i), \quad (11)$$

где M_{ji} , P_{ji} — линейная и площадная продуктивности j -го химического элемента в i -ом сечении; v_i — значение мультиплексивного показателя зональности в i -м сечении, i -й точке; v_0 — то же в центре оруденения; $\left(v_0 = \frac{\bar{C}_{j=1;m}}{\bar{C}_{j=n+1;m}} \cdot \dots \cdot \frac{\bar{C}_{j=n;m}}{\bar{C}_{j=2n;m}}\right)$; $A, B, \dots, Q, \alpha, \dots, r, \delta, \lambda, \tau$ — числовые коэффициенты; $\Delta A = A_{j=1} + \dots + A_{j=n} - A_{j=n+1} - \dots - A_{j=2n}, \dots, \Delta R = R_{j=1} + \dots + R_{j=n} - \dots - R_{j=n+1} - \dots - R_{j=2n}$; L — ширина, S — площадь ореола или его части, в пределах которой рассчитывается среднее содержание химических элементов (\bar{C}); индексы при буквах означают: j — признаки химического элемента; i — признак точки, линии или плоскости пересечения ореола; m — признак максимального значения параметра.

Приведенные уравнения дополняются функциями, связывающими максимальные значения содержания или линейной продуктивности ореола (C_{mo} , M_{mo}) с аналогичными параметрами рудного тела или группы рудных тел (C_{mp} , M_{mp}), а также уравнением, описывающим изменение линейной продуктивности ореола M_{io} с глубиной:

$$\ln C_{mp} = t_1 \ln^3 C_{mo} + t_2 \ln^2 C_{mo} + t_3 \ln C_{mo} + t_4, \quad (12)$$

$$\ln M_{mp} = h_1 \ln^3 M_{mo} + h_2 \ln^2 M_{mo} + h_3 \ln M_{mo} + h_4, \quad (13)$$

$$\ln M_{io} = \ln M_{mo} + \kappa y_i^\varphi, \quad \varphi = 1 \div 2, \quad (14)$$

где $t_1, \dots, t_4, h_1, \dots, h_4, \kappa$ — эмпирические числовые коэффициенты.

Уравнения (1)–(4) можно рассматривать как математическую статистически детерминированную геохимическую модель моноцентрового оруденения, относящегося к одной из групп изученных рудных объектов гидротермального генезиса. Основными являются уравнения (7), (12), (14), из которых путем введения дополнительных понятий и связанных с этим математических преобразований получены уравнения (8)–(11), (13). Уравнения (1)–(11) описывают распределение большой группы ореолообразующих химических элементов, включая олово, свинец, цинк, медь,

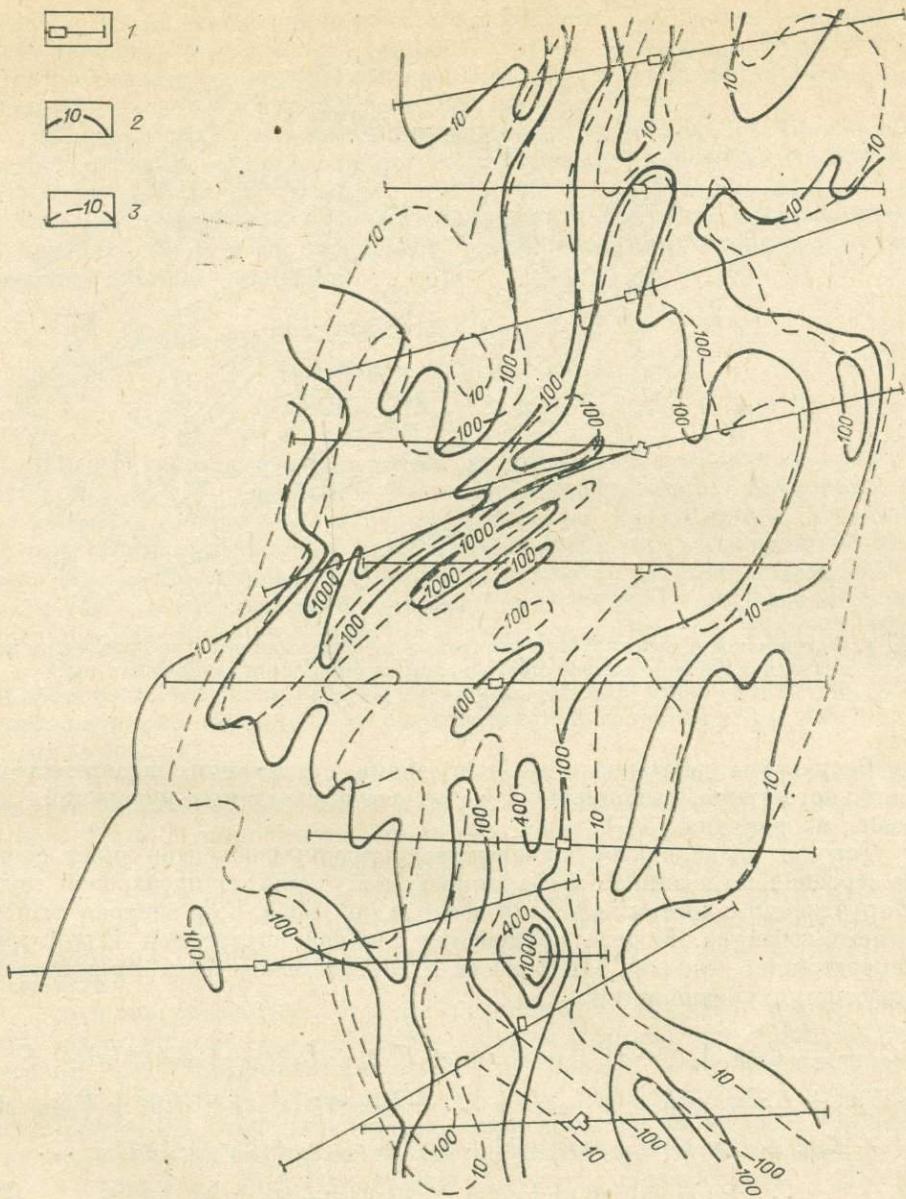


Рис. 3. Фактическое и моделируемое распределение содержания олова (усл. ед.) в горизонтальном разрезе оловорудного месторождения штокверкового типа.

1 — опробованные буровые скважины и подземные горные выработки; 2, 3 — изолинии: 2 — фактического содержания олова, 3 — рассчитанные на основе функции (15) по осредненным данным.

серебро, мышьяк, висмут, молибден. Эмпирические зависимости, выраженные уравнениями (12)–(14), пока установлены только для олова, свинца и цинка, (7) представляет собой уравнение поверхности второго порядка, записанное в общем виде для произвольно расположенной прямоугольной системы координат. В рассматриваемом случае, т. е. применительно к геохимической модели оруденения, это уравнение аппроксимирует распределение содержания химических элементов в трехмерном пространстве в виде семейств концентрических эллипсоидов. При равенстве одной из координат полю (7) преобразуется в (6) линии второго порядка, описывающие распределение вещества в плоскости в виде семейств концентрических эллипсов.

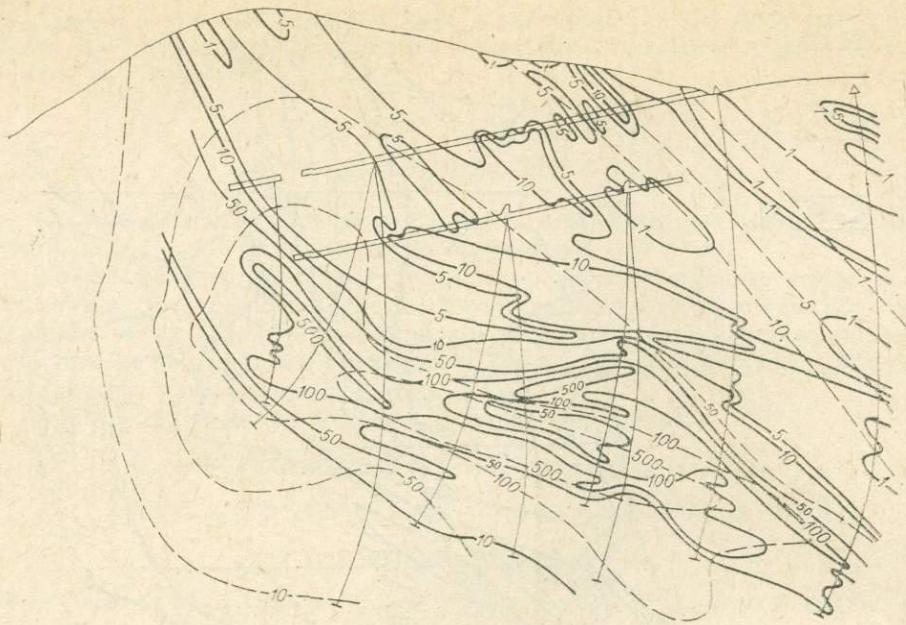


Рис. 4. Фактическое и моделируемое распределение содержания олова (усл. ед.) в вертикальном разрезе оловорудного месторождения штокверкового типа.
Усл. обозн. см. на рис. 3.

Результаты двумерного моделирования оруденения штокверкового и жильного типов, выполненного на основе приведенных уравнений, показаны на рисунках 3—5.

Так как подавляющее большинство природных объектов имеет сложное строение, то возникла необходимость получения поликентровой модели оруденения с учетом не только центров привноса, но и центров выноса рудного вещества. Модель оруденения с такой внутренней структурой распределения вещества в плоскости и объеме может быть представлена следующими уравнениями:

$$C_i - C_{m1} \exp(A_1 x_i^2 + B_1 y_i^2 + E_1 x_i y_i + K_1 x_i + L_1 y_i) - C_{m2} \exp(A_2 x_i^2 + B_2 y_i^2 + E_2 x_i y_i + K_2 x_i + L_2 y_i) - \dots - C_{mu} \exp(A_u x_i^2 + B_u y_i^2 + E_u x_i y_i + K_u x_i + L_u y_i) + C_{b1} \exp(a_1 x_i^2 + b_1 y_i^2 + e_1 x_i y_i + k_1 x_i + l_1 y_i) + \dots + C_{bv} \exp(av x_i^2 + bv y_i^2 + ev x_i y_i + kv x_i + lv y_i) = 0, \quad (15)$$

$$C_i - C_{m1} \exp(A_1 x_i^2 + B_1 y_i^2 + D_1 z_i^2 + E_1 x_i y_i + F_1 x_i z_i + H_1 y_i z_i + K_1 x_i + L_1 y_i + M_1 z_i) - C_{m2} \exp(A_2 x_i^2 + B_2 y_i^2 + D_2 z_i^2 + E_2 x_i y_i + F_2 x_i z_i + H_2 y_i z_i + K_2 x_i + L_2 y_i + M_2 z_i) - \dots - C_{mu} \exp(A_u x_i^2 + B_u y_i^2 + D_u z_i^2 + E_u x_i y_i + F_u x_i z_i + H_u y_i z_i + K_u x_i + L_u y_i + M_u z_i) + C_{b1} \exp(a_1 x_i^2 + b_1 y_i^2 + d_1 z_i^2 + e_1 x_i y_i + f_1 x_i z_i + h_1 y_i z_i + K_1 x_i + l_1 y_i + m_1 z_i) + \dots + C_{bv} \exp(av x_i^2 + bv y_i^2 + dv z_i^2 + ev x_i y_i + fv x_i z_i + hv y_i z_i + k_v x_i + l_v y_i + m_v z_i) = 0, \quad (16)$$

где $C_{m1} + C_{mu}$ — содержание химического элемента в центрах накопления (от 1-го до u -го); $C_{b1} + C_{bv}$ — количества вынесенного элемента в центрах выноса (от 1-го до v -го). Приведенные уравнения (15) и (16) можно рассматривать как математическую статистически детерминированную модель поликентрового оловянного оруденения.

На основе обобщенной модели оруденения разработаны методы количественной оценки оловорудных и других объектов, в соответствии с которыми задачи количественного прогнозирования могут решаться в одно-, двух- и трехмерном пространстве.

Из одномерных вариантов решения задачи локального количественного прогнозирования оловянного оруденения можно выделить два наиболее употребительных.

1. Количественная оценка по значениям линейной продуктивности рудных тел (M_{ip}) и их первичных ореолов (M_{io}) выполняется на основе решения системы уравнений:

$$\begin{aligned}\ln M_{ip} &= \ln M_{mp} + \alpha_p y_i^2, \\ \ln M_{io} &= \ln M_{mo} + \alpha_o y_i, \\ \ln M_{mp} &= t_1 \ln^3 M_{mo} + t_2 \ln^2 M_{mo} + t_3 \ln M_{mo} + t_4 = 0.\end{aligned}$$

В приведенной системе уравнений неизвестными величинами являются M_{mp} , M_{mo} и y_i — расстояние от уровня с максимальным оруденением до i -го сечения. В результате решения системы определяются: расстояние от максимума оруденения и его размах, значение продуктивности рудного тела (или суммы рудных тел) и ореола на любой глубине, прогнозные запасы металла на изученный интервал длины рудных тел. Решение реализовано в виде программ для ЭВМ и номограмм [Бураго, Чуланов, 1978].

При интерпретации результатов счета необходимо знать степень эродированности оцениваемого объекта, которая определяется по мультипликативным геохимическим показателям или любыми другими доступными методами.

2. Количественная оценка оловянного оруденения по площадной продуктивности ореола олова или его удельным запасам, т. е. запасам в слое 1 м (q_{io}), выполняется с помощью специальной номограммы, составленной на основе уравнений $\ln q_{io} = \ln q_{mo} + \lambda_o y_i^2$, $\ln q_{ip} = \ln q_{mp} + \lambda_p y_i^2$, где q_{ip} — удельные запасы олова в рудном теле или группе рудных тел на i -м уровне пересечения; q_{mo} — то же в ореоле (включая рудное тело) на уровне максимального оруденения; q_{mp} — то же в рудном теле.

На номограмме (рис. 6) в логарифмическом масштабе в координатах «удельные запасы» (q_{io}) — «запасы олова в рудных телах» (Q) показаны уровни среза (прямые линии 0 — +1 — верхняя половина оруденения; 0 — -1 — нижняя) и кривые запасов олова для различных по крупности месторождений. Определив уровень среза и q_{io} по олову на поверхности, можно, пользуясь номограммой, быстро оценить прогнозные запасы объекта на глубине, а также количество металла, перешедшего в россыпи. В тех случаях, когда нет возможности надежно определить уровень среза объекта, необходимо переходить к его оценке на основе двухмерной модели.

При решении двухмерных задач локального количественного прогнозирования используются уравнения (4), (6), (8), (11)–(13), (15). Задачи могут решаться: в продольном разрезе рудного тела или среза, с предварительным осреднением данных на мощность рудного тела или пластикообразного блока пород; в поперечном вертикальном разрезе; в горизонтальной плоскости, а также в любом наклонном разрезе. Расчеты выполняются решением системы уравнений, составленной на основе одного из уравнений (4), (6), (11) или (15) с последующим использованием (при необходимости) уравнения (12) или (13). Непременное условие решения задачи — неровная поверхность опробования (исходные точки не должны лежать на одной прямой) и число исходных точек $N \geq 6$. В результате расчетов можно получить прогнозные характеристики оцениваемого объекта — значение и координаты максимума оруденения, контуры промышленных руд, склонение рудных столбов, степень эродированности (в процентах или долях единицы), прогнозные запасы металла в ореоле

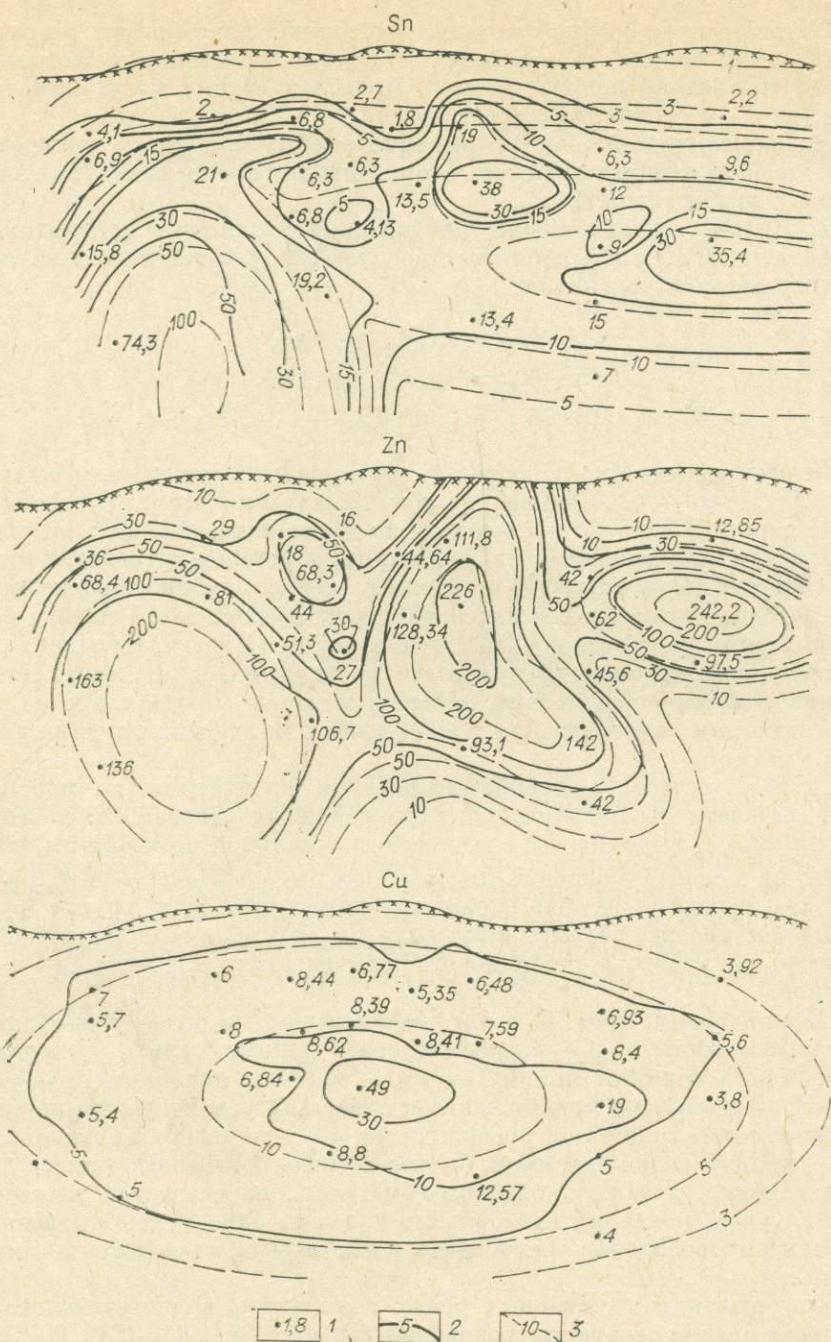
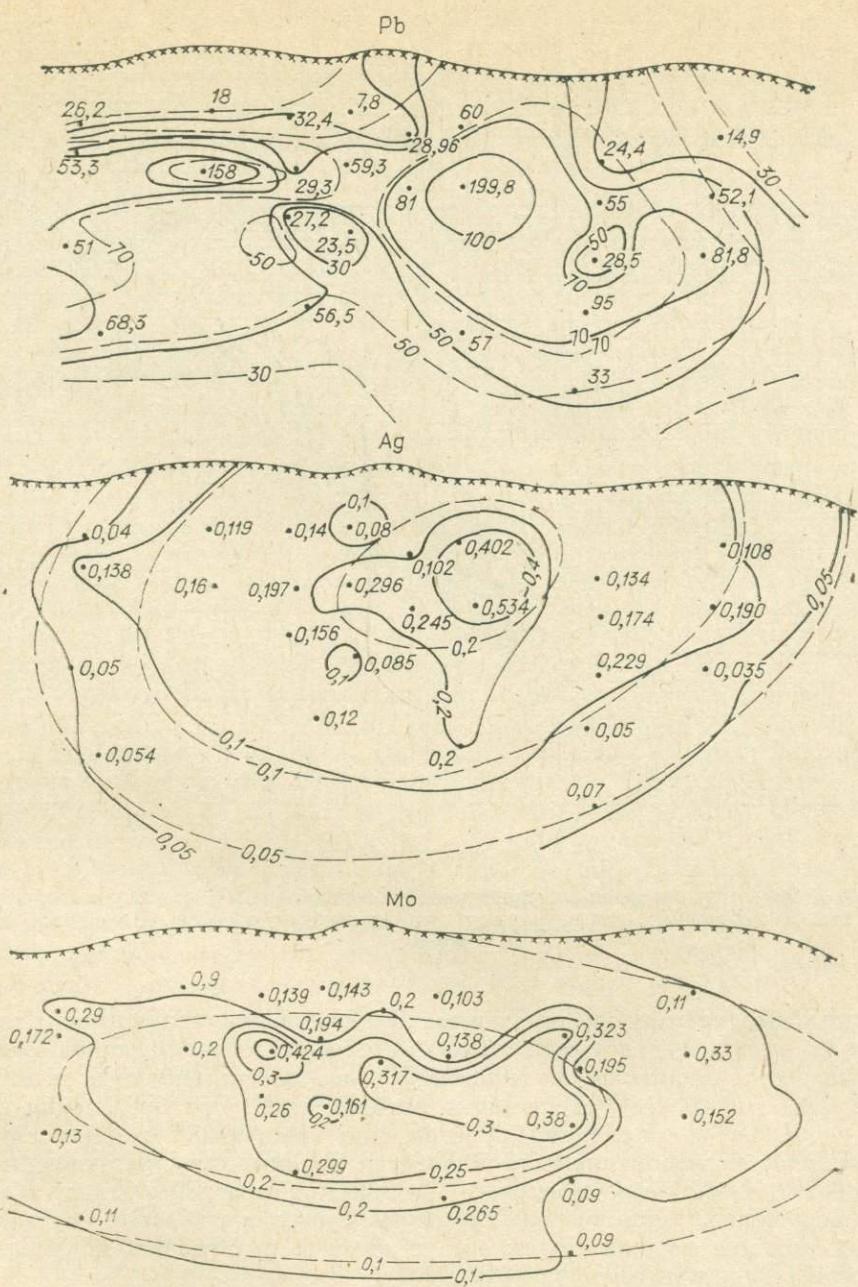


Рис. 5. Фактическое и моделируемое распределение содержания основных ореолообразующих элементов в проекции на вертикальную плоскость продольно вытянутого блока пород мощностью 200 м, включающего основные жильные рудные тела и их первичные ореолы.

1 — проекции пересечений буровыми скважинами центральной части блока и среднее содержание химических элементов в пересечениях (усл. ед.); 2 — изолинии фактического содержания химических элементов; 3 — то же, рассчитанное на основе функции (15).

или рудных телах. В качестве исходных данных могут быть использованы как содержание химических элементов, так и другие характеристики оруденения, полученные на их основе (среднее содержание, линейные продуктивности, значения геохимических показателей зональности и др.).

Количественная оценка оруденения на основе трехмерной модели может выполняться путем решения систем уравнений, составленных на базе



уравнений (5), (7) или (16). В качестве исходных данных могут быть использованы содержания химических элементов и различные мульти-пликативные показатели. Количество исходных точек, необходимых для решения задачи, должно быть не менее 10. Другим важным условием решения задачи является неровная поверхность опробования, т. е. исходные точки не должны лежать в одной плоскости. Из-за больших объемов вычислений, особенно при использовании уравнения (16), задача практически может быть решена только с помощью ЭВМ. В результате для каждого рудного или ореолообразующего химического элемента могут быть определены: координаты центра (центров) оруденения; положение поверхности, ограничивающей участки объекта с промышленными характеристиками руд; запасы металла; степень эродированности объекта и др.

Применение для оценки оловянного оруденения на глубину количественных методов, разработанных на основе статистически детермини-

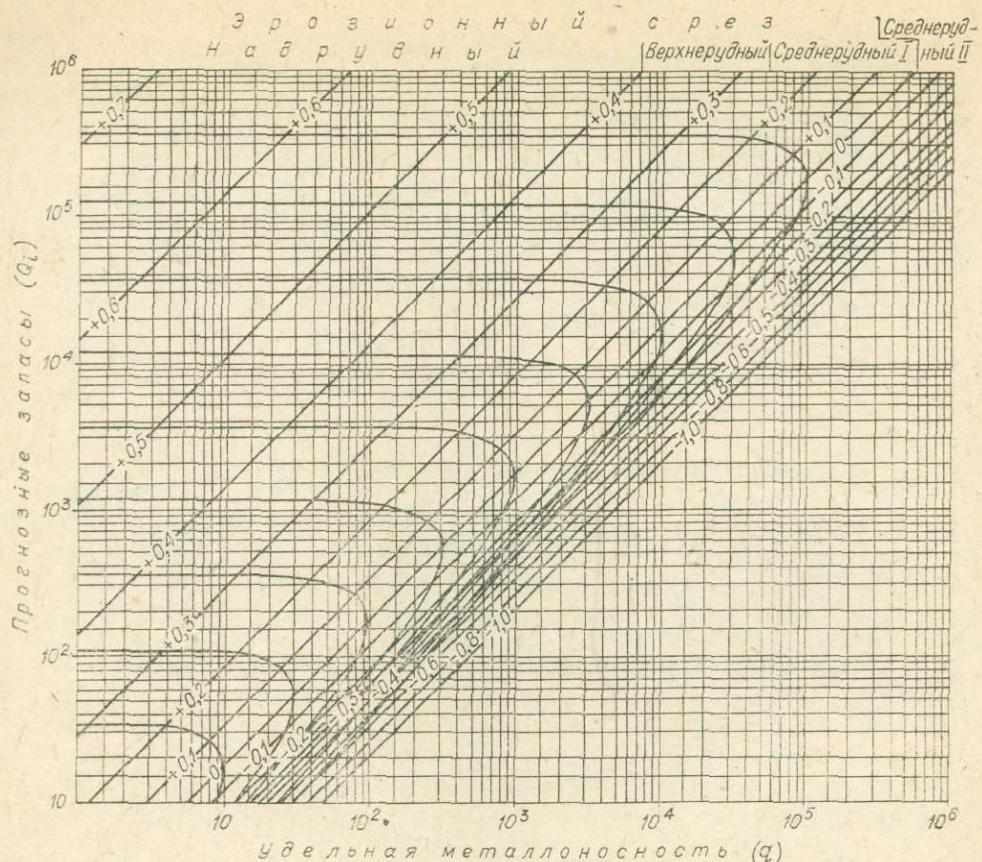


Рис. 6. Номограмма определения прогнозных запасов олова (Q) по удельной металлоносности (q) первичных или вторичных литохимических ореолов. Пояснения см. в тексте.

рованных моделей оруденения, показало большие возможности этих методов и их вполне удовлетворительную надежность. Предложенная модель оруденения, естественно, не претендует на исчерпывающую полноту, но отражает наиболее существенные закономерности распределения рудного вещества в трехмерном пространстве вмещающих горных пород. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку теоретических основ геохимических моделей рудных объектов, обобщение эмпирических данных, совершенствование математических приемов решения прикладных задач и реализацию полученных решений в виде программ для ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

- Бураго А. И.** Количественный прогноз оруденения на глубину по геохимическим данным.— В кн.: Генезис эндогенной минерализации Дальнего Востока. Владивосток, 1978, с. 58—65.
- Бураго А. И., Чуланов Э. И.** Первичные ореолы оловорудных месторождений Приморья и методы их оценки.— В кн.: Геохимические основы поисков и прогнозирования рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1978, с. 119—138.
- Ивакин А. Н., Антонов П. Н.** Новоевольфрамовое месторождение на востоке страны.— Цветные металлы, 1967, № 9, с. 90—92.
- Ивакин А. Н., Василенко В. П., Лаврик П. И., Бабаева М. М.** Перспективы расширения минерально-сырьевой базы вольфрама в Приморье.— Разведка и охрана недр, 1972, № 12, с. 14—19.
- Иванов Ю. Г.** Металлогения олова Приморья.— М.: Недра, 1971.— 272 с.

**ВОЗМОЖНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ
ПРИМЕНЕНИЯ КРУПНООБЪЕМНОГО ОПРОБОВАНИЯ
ПРИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Для распределения золота в природных объектах характернейшей чертой является неоднородность по форме, размеру и весу частиц золота и неравномерность распределения этих частиц в породе, обусловленная неоднородностью образования горной породы и либо самого золота, либо тех или других форм (частиц) его нахождения в ней. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев, за редким исключением, изучаемые на золотоносность горные породы в отношении распределения в них золота являются чрезвычайно неоднородными образованиями, состоящими из минералов, их сочетаний, сколь угодно малых или больших объемов этих пород, не тождественных по содержанию золота между собою даже тогда, когда между ними отсутствуют качественные различия по существу.

Асимметрия распределения содержаний золота в горных породах, обусловленная самородным состоянием и одновременным присутствием его в породах и рудах в самородной, мелкой, тонкой и тонкодисперсной форме, и связанные с нею погрешности определения частных содержаний, среднего содержания и запасов впервые подробно изучены П. Л. Каллистовым [1948] и подтверждены затем многими.

Важнейшим теоретическим следствием особенностей асимметрии распределения является неравномерность значений признака, одинаково отклоняющихся в большую или меньшую сторону от среднего, а значит, и неравновероятность положительных и отрицательных ошибок определения этого среднего по данным выборки ограниченного объема. На практике указанные свойства распределения золота по крупности приводят к тому, что отрицательные ошибки определения среднего содержания по данным опробовательской выборки более вероятны, чем положительные, а возможные размеры первых меньше размеров вторых.

Следовательно, методика опробования золотосодержащих пород на начальной стадии должна ориентироваться на отбор таких проб, которые должны содержать группу зерен золота, отражающую распределение их в породе по классам крупности. При одинаковом размере зерен и равномерном их распределении вес пробы, которая будет содержать одно такое зерно, определится из соотношения $P = a/c$ (t), где P — вес пробы, t ; a — вес одной золотины, г; c — содержание золота в породе, г/т.

Введя в формулу коэффициент вариации содержаний K , получим формулу расчета надежного веса пробы, т. е. такого веса, при котором в отобранной нами пробе будет содержаться не менее одного зерна золота ожидаемой нами размерности: $P = K a/c$.

Но, как уже указывалось, чаще всего золотоносность пород обусловлена нахождением в них зерен различной величины, причем крупные золотины могут концентрировать в себе до 90% и более золота, содержащегося в породе, поэтому объем отбираемой нами пробы должен быть определен с расчетом на попадание в пробу хотя бы одной такой крупной золотины, и, следовательно, задача определения надежного веса пробы сводится к определению размеров (веса) золотин, на долю которых приходится основное количество содержащегося в породе металла. Такие золотины можно назвать критическими — отсутствие их в отобранной пробе приведет к резкому занижению содержания, с другой стороны, увеличение веса проб с целью повышения надежности отбора в пробу золотин критического или несколько большого размера приведет к значительному увеличению объема проб и неоправданному увеличению трудовых затрат по их отбору и обработке.

По нашим определениям, вес наименьших зерен плавучего золота (бусы), широко распространенного в золотоносных россыпях и еще улав-

ливаемого при промывке шлихов, составляет 0,04—0,08 мг. Если предположить, что кларковое содержание золота в осадочно-метаморфических породах 4—5 мг/т, по А. П. Виноградову [1956, 1962], обусловлено нахождением в них золота указанной выше крупности, то число таких золотин на 1 т породы должно составлять 50—100 шт., и, следовательно, вес надежной пробы, в которой находилась бы одна такая золотинка, должен составлять 10—20 кг, причем эта пробы должна обрабатываться как одна навеска. Однако, как известно, высокочувствительные методы анализа (спектрохимические, атомно-абсорбционные, нейтронно-активационные) обнаруживают кларковое содержание золота в очень малых навесках, приготовленных чаще всего способом, исключающим представительность этих навесок для содержащихся в породах золотин больших размеров (даже веса 0,04—0,08 мг), и это обстоятельство еще раз указывает на то, что общепринятый кларк золота в земной коре занижен.

Для определения критических размеров золотин следует пользоваться данными шлихового опробования речных отложений того района, где намечается постановка геохимического опробования, или, еще лучше, данными ситовых анализов из известных в районе россыпей. В частности, на основе имеющихся данных по золотоносности Енисейского кряжа можно принять, что основную массу золота его россыпей составляют мелкие и весьма мелкие зерна весом 10—20 мг, а золотины весом 50—200 мг составляют 20—50% всего количества. Отсюда следует, что наиболее рационально вести расчет веса пробы на находку одного зерна золота весом 10—50 мг, средним весом 20 мг при минимальном среднем ожидаемом содержании золота в породе 1,0 г/т. В этом случае в пробу будет отобрано также несколько зерен весом 0,1—1 мг, отражающих более 90% от общего количества золотин и не менее 50% от общего содержания золота в породе. Таким образом, вес пробы на находку одного зерна золота весом 20 мг определяется из соотношения $P = KD/AC$ (т), где K — коэффициент надежности (коэффициент вариации содержаний золота); D — средний вес критической золотины, мг; C — среднее содержание золота в породе, г/т; A — доля критических золотин в общем среднем содержании золота.

Принимая $K = 2$ (200%), $D = 20$ мг, $A = 50\%$ (0,5) и $C = 1,0$ г/т, получаем

$$P = \frac{2 \times 20}{0,5 \times C} = \frac{40}{0,5 \times C} = \frac{80}{C} \text{ (т)},$$

при

$$C = 1,0 \text{ г/т}, P = 80 \text{ кг},$$

$$C = 0,5 \text{ г/т}, P = 160 \text{ кг}.$$

Из полученного соотношения можно, наоборот, оценить степень представительности проб, наиболее распространенных в практике. Так, при сохранении указанных соотношений критических золотин пробы весом 20 кг оказывается представительной только для содержания золота 4 г/т, а штуфная пробы весом 1 кг — для содержания 80 г/т.

Таким образом, отдельные пробы пород весом 10—20 кг можно считать представительными только для случаев весьма равномерного распределения в породах частиц золота весом не более 1—5 мг при общем его содержании около 1 г/т. При возрастании веса частиц и неравномерности их распределения в породе эти пробы оказываются непредставительными. Однако на практике все выводы геологов о золотоносности тех или иных горных пород (на поисковой стадии их изучения) основаны на закономерностях изменения в этих породах содержаний золота, определенных по ряду отдельных проб, многие из которых теоретически и практически оказываются непредставительными. При этом считается общепринятым [Альбов, 1975], что среднее содержание золота, полученное на основе некоторого количества проб, можно рассматривать как одну групповую пробы, вероятная погрешность среднего содержания которой будет соста-

влять $P = p/Vn$, где p — вероятная погрешность индивидуальной пробы; n — количество проб.

Если, например, $p = \pm 100\%$, то при $n = 25P = \mp 100/\sqrt{25} = \pm 20\%$, а при $n = 100 P = \pm 100/\sqrt{100} = \pm 10\%$, откуда следует, что снизить погрешности определения среднего содержания можно путем увеличения количества проб.

Однако этот математически бесспорный вывод, справедливый для подавляющего большинства рудных элементов, может быть отнесен к золоту с большой осторожностью опять-таки в силу чрезвычайной неравномерности распределения частиц золота в породе и невозможности устраниć эту неравномерность при усреднении пробы и приготовлении лабораторной навески. Так, например, по данным Б. С. Лунева и Р. Е. Уткина [1973], истинное среднее содержание золота устанавливалось ими спектрохимическим методом только в одном из 150 анализов одной и той же пробы, а нейтронно-активационным — только в одной из 4000 анализов. Во всех остальных 149 спектрохимических и 3999 нейтронно-активационных определениях фиксировались лишь кларковые (первые миллиграммы) содержания золота, определенные с формально вычисленной погрешностью среднего в десятие и сотые доли процента. Однако, несмотря на такое большое количество частных проб, среднее содержание золота, вычисленное безупречно с математической точки зрения, осталось в действительности в несколько сот раз меньшим истинного среднего содержания в изучаемой породе.

На практике мы только в редких случаях подвергаем многократному анализу одну и ту же пробу (в частности, только так называемые арбитражные анализы проводятся из 5—6 навесок). В подавляющем большинстве случаев определение содержания золота в пробе делается только в одной — двух навесках, и поэтому ошибка определения среднего в действительности может быть чрезвычайно высока. Думая достигнуть представительности опробования анализом многих (4—10) навесок малонавесочными методами анализа (спектрохимическим, атомно-абсорбционным, нейтронно-активационным) и убеждаясь в высокой воспроизводимости анализов навесок этими методами, многие исследователи забывают, что полученные ими цифры в подавляющем большинстве случаев все-таки не характеризуют среднее содержание золота в породе, так как для получения содержания начальная пробы должна быть большой по объему и соответствующим образом обработанной. Другими словами, здесь смешиваются понятия точности и представительности методов анализа на золото, анализ действительной пробы горной породы подменяется анализом случайных ее кусков.

Известное в геологической литературе [Щербаков, 1976; Аношин, 1977] понятие так называемой «геологической представительности» малонавесочных методов анализов на золото лишь пытается оправдать их массовое применение и скрыть отсутствие в этих методах опробования и анализа горных пород представительность вообще. Попытки доказать представительность малонавесочных методов анализа горных пород на золото математическим путем (высокая чувствительность, точность и воспроизводимость анализов малых навесок) с учетом изложенного, по нашему мнению, несостоятельны.

Нахождение золота в горных породах в виде самородных частиц, различных по форме и величине, обусловливает, таким образом, необходимость отбора крупных по объему проб и, следовательно, изыскания возможностей сокращения их количества и веса или таких способов их обработки и сокращения, которые обеспечивали бы попадание критических золотин в конечную лабораторную навеску.

Для изучения поведения золота в процессе дробления и сокращения проб и выявления тех стадий их обработки, на которых происходит максимальная концентрация частиц, нами проведены опытные работы с пробами различного состава, в которые вводилось самородное золото в зернах

различной крупности и веса. Были представлены практически все случаи нахождения золота в природе (тонкодисперсное, свободное мелкое и крупное золото), а количество зерен вводимого золота (300—400 зерен) подбиралось так, чтобы после всех стадий сокращения обеспечить расчетное попадание в окончательную навеску не менее 1—2 зерен. Среднее действительное содержание золота в пробах колебалось в пределах 1—10 г/т.

Обработка проводилась по следующей схеме: последовательное дробление до диаметра частиц 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,1 мм; деление пробы на две части после каждой операции дробления; дальнейшее дробление одной части пробы до следующего меньшего диаметра с последующим делением на две части и т. д.; деление второй части пробы после каждого сита еще на две части, одна из которых разбивалась на ряд частных проб — навесок весом 300—500 г каждая, а вторая рассеивалась на фракции — 10+5, —5+2, —2+1, —1+0,5, —0,5+0,25, —0,25+0,1 и —0,1 мм. Такая обработка позволяла проследить судьбу золотин не только при обычной схеме обработки (первые части проб), но и особенности их распределения во фракциях различной крупности на всех стадиях дробления (вторые части проб). В результате обработки каждая из них разделялась на 60—70 частных проб — навесок, которые тщательно истирались и подвергались многократному анализу на золото спектральным, атомно-абсорбционным, нейтронно-активационным и пробирным методом до полной ликвидации материала каждой пробы.

Результаты анализов подтвердили чрезвычайную неравномерность распределения золота при дроблении и делении проб и преимущественное накопление его в мелких фракциях.

При дроблении проб с тонким золотом, связанным с сульфидами (рис. 1), для золота характерны следующие особенности.

1. На всех стадиях дробления пробы содержание золота останется примерно одинаковым, соответствующим среднему содержанию золота в породе.

2. Во фракции —0,25+0,1 мм после дробления пробы до —10 мм происходит резкое обогащение золотом за счет преимущественно избирательного измельчения и выкрашивания золотосодержащих сульфидов.

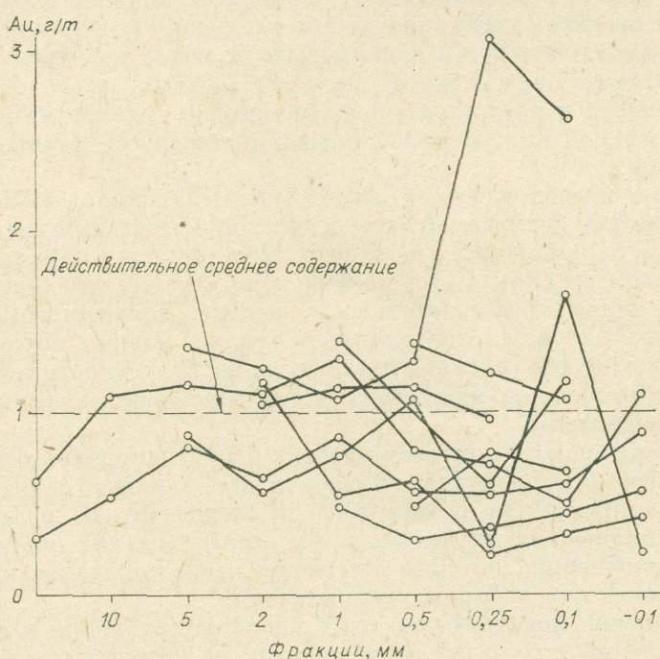


Рис. 1. Распределение золота при дроблении пробы кварцево-сульфидного состава с тонкодисперсным золотом.

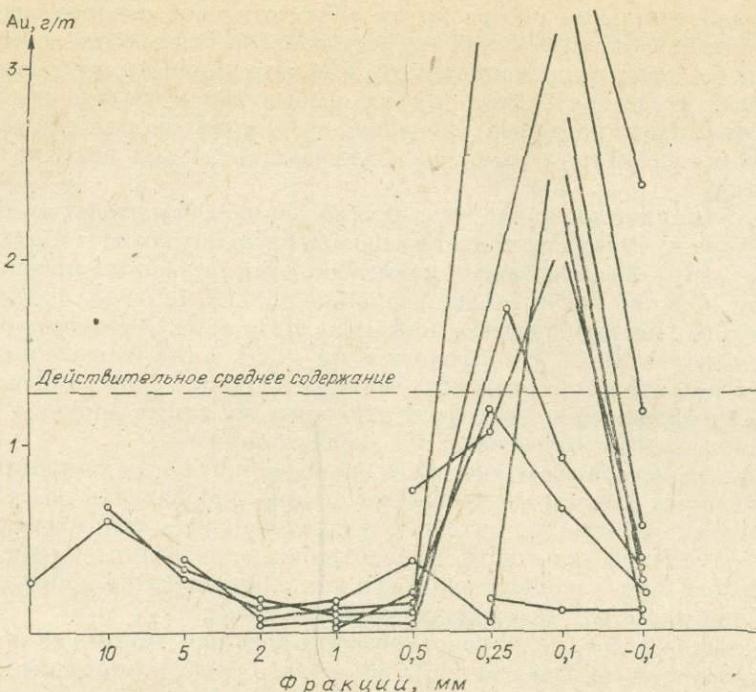


Рис. 2. Распределение золота при дроблении пробы со свободным мелким золотом.

3. Фракция — 0,1 мм отражает среднее содержание золота на всех стадиях дробления, что позволяет в принципе для данного типа золотосодержащего материала отказаться от операций сокращения и истирания пробы, заменив их крупным дроблением материала до (—5)—(—2) мм и отсевом фракции —0,1 мм.

При дроблении проб с крупным свободным золотом распределение его резко усложняется (рис. 2).

Ни одна лабораторная навеска на всех стадиях дробления пробы не отражает действительного среднего содержания золота в пробе.

На всех стадиях дробления пробы среднее содержание золота во фракциях практически постоянно, соответствует содержанию тонкодисперсного «атомарного» золота в матрице породы. Крупное свободное золото анализом 2—4 навесок каждой фракции практически не улавливается и, таким образом, на определение среднего содержания влияния не оказывает.

На всех стадиях дробления проб происходит резкое обогащение золотом фракций —1 + 0,5, —0,5 + 0,25 и —0,25 + 0,1 мм вследствие мелких размеров золотин и быстрой «просадки» золотин.

Содержание золота во фракциях —1 + 0,5, —0,5 + 0,25, —0,25 + 0,1 и —0,1 мм постепенно уменьшается с увеличением степени дробления породы, что вызвано увеличением линейных размеров золотин в процессе обработки пробы.

Содержание золота во фракции —0,1 мм наиболее высокое на стадии крупного дробления (—10 мм) и постепенно убывает с уменьшением размера частиц пробы, что свидетельствует о максимальном высвобождении мелких золотин на ранних стадиях обработки пробы и последующем укрупнении золотин на поздних стадиях дробления.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают чрезвычайную неравномерность распределения зерен свободного золота в пробе, не устранимую на всех стадиях обработки и сокращения пробы, вследствие чего ни одна навеска не отражает (или может только случайно и очень редко отражать) среднее содержание золота в породе и неизбежно занижает это содержание. Это обстоятельство объясняет, почему при теоретиче-

ски предпочтительном отборе крупнообъемных проб среднее содержание золота в них не оказывается более достоверным, чем анализ мелких проб. Другими словами, содержание золота в мелких, явно непредставительных и крупных представительных пробах оказывается примерно одинаковым, потому что анализ на золото в конечном счете производится для тех и других проб из одной-двух одинаково непредставительных навесок одного и того же веса.

Это эмпирически давно уже установленное обстоятельство приводит на практике к отказу от отбора крупнообъемных бороздовых и задирковых проб весом 10—20 кг и замене их точечными и штупфными пробами весом 1—1,5 кг. Однако такая замена возможна только на очень ограниченном числе рудных месторождений с тонким золотом типа Витватерсранда либо с хорошо изученными и морфологически очень четко выраженнымимирудными телами, где недостоверность частных штупфных проб компенсируется отбором их большого количества и периодически контролируется другими способами опробования и данными эксплуатации.

Для поискового геохимического опробования, когда характер распределения золота чаще всего неизвестен и само опробование по сути своей представляет «охоту» за малейшими проявлениями золотоносности, за каждой единичной золотиной, малообъемное опробование ни в коем случае не может быть рекомендовано, так как оно неизбежно приведет к пропуску большинства золоторудных проявлений.

На стадии работ, когда золотоносность того или другого слоя или геологического тела еще неизвестна, а количество проб, которые мы можем из этого тела отобрать, очень ограничено, требования к достоверности каждой отобранный пробы должны быть очень высоки, так как отрицательный или заниженный результат опробования служит основанием для прекращения работ, а вернуться к этому объекту удается лишь спустя долгое время.

Поэтому каждая пробы при региональных геохимических исследованиях на золото должна обрабатываться таким образом, чтобы в лабораторную навеску этой пробы было гарантировано попадание частиц самородного золота. Общепринятые в настоящее время схемы обработки золотосодержащих проб этого не гарантируют и должны быть изменены в соответствии с результатами опытных работ по изучению распределения частиц золота при дроблении пробы.

По мнению авторов, на основе изложенных данных наиболее целесообразной при геохимических исследованиях на золото представляется следующая последовательность операций: 1) отбор крупных штупфных или глыбовых проб весом 20—30 кг; 2) дробление пробы на щековой дробилке до диаметра частиц 10 мм; 3) отсев фракции менее 0,1 мм с последующим анализом фракции пробирным или атомно-абсорбционным методом, а по возможности — анализом всей фракции гидрохлорированием или обработкой в царской водке; 4) дробление оставшегося материала пробы на валковой дробилке до диаметра 1 мм; 5) промывка пробы на лотке и изучение тяжелого шлиха.

Некоторые результаты крупнообъемного опробования по изложенной выше схеме в сопоставлении с обычным штупфным опробованием тех же пород приведены в таблице.

Крупнообъемное опробование по приведенной выше методике требует, безусловно, больших физических затрат на отбор, транспортировку и обработку проб. Вместе с тем, как видно из таблицы, оно обладает существенными преимуществами: повышением представительности и точности опробования; определением формы нахождения золота в изучаемых объектах; 3) попутным получением и изучением тяжелой фракции породы, несущей ценную геохимическую информацию, которую к тому же невозможно получить никаким другим способом.

Благодаря гидрохлорированию или обработке царской водкой с последующим осаждением золота представляется возможность анализировать большие навески вещества (0,5—2 кг) тех фракций, в которых при дроблении пробы происходит преимущественная концентрация крупных

Сопоставление содержаний золота (мг/т) по данным штуфного и крупнообъемного опробования

Номер пробы	Порода	Проба			Номер пробы	Порода	Проба				
		штуфная, весом 1—1,5 кг	глыбовая, весом 15—30 кг				штуфная, весом 1—1,5 кг	глыбовая, весом 15—30 кг			
			фракция 0,1 мм	тиканая фракция (шилих)				фракция 0,1 мм	тиканая фракция (шилих)		
501	Граносиенит пор-	7,0	42,1	417	550	Граносиенит пор-	37,2	283,0	534		
502	фировидный	6,4	25,7	3410	551	фировидный	61,4	207,6	4520		
503		11,0	34,5	130	552	Роговик	85,7	465,8	4900		
504		32,1	81,7	1090	553	Граносиенит пор-	94,1	115,0	71		
505		16,5	138,1	2310	554	фировидный					
506		9,8	63,2	337	555	Сланец глинистый	115,7	611,7	9240		
507		75,1	106,5	9280	556		14,6	30,4	880		
511		41,4	102,3	1510	557		194,2	550	15830		
512		16,9	65,0	1970	558		9,0	25,4	9000		
513		13,4	21,5	178	559						
516	Гранодиорит пор-	11,3	29,9	176	560	Роговик	27,9	79,8	9850		
517	фировидный	20,8	34,9	316	561		13,8	28,2	46		
518		2,6	17,2	602	562		16,3	39,4	150		
519		20,6	51,7	1470	563		65,2	320,7	24400		
520		71,7	528,0	3500	564		0,63	6,8	790		
524	Сланцы орогови-кованные	2,4	2,4	551	565		83,0	306,8	9210		
525		2,0	5,1	52	566		18,6	2,8	2190		
526		1,53	5,4	137	567		46,4	405,3	4500		
527		1,6	9,7	332	568		10,0	27,2	960		
528		3,4	4,4	2450	569		4,6	13,7	570		
548	Граносиенит пор-	22,7	42,1	1140	570	Граносиенит	1,3	8,5	6560		
549	фировидный	15,0	41,0	612	571	Роговик	9,2	32,1	12400		
					572		2087	4743	83300		
							8,5	44,5	1980		

золотин или хрупких золотосодержащих сульфидов, что резко повышает достоверность анализа. Методика особенно эффективна при опробовании пород мелким и средним свободным золотом и с тонкодисперсным золотом в сульфидах. Средние содержания металла в таких породах, определенные по данным крупнообъемных проб, оказываются во много раз больше тех содержаний, которые определяются в этих породах всеми другими малонавесочными методами. Кроме того, предлагаемая методика позволяет полностью отказаться от наиболее трудоемкой операции — истирания проб и все работы по определению содержания золота производить непосредственно в полевых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

- Альбов М. Н. Опробование месторождений полезных ископаемых.— М.: Наука, 1975.— 239 с.
- Аношин Г. Н. Золото в магматических горных породах.— Новосибирск: Наука, 1977.— 207 с.
- Виноградов А. П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре.— Геохимия, 1956, № 1, с. 6—52.
- Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры.— Геохимия, 1962, № 7, с. 555—571.
- Каллистов П. Л. Асимметрия распределения некоторых свойств золота и связанные с нею погрешности определения запасов.— В кн.: Сборник материалов по геологии золота и платины. Вып. 9. М.: изд. ОБТИ Главспеццветмета, 1948, с. 58—79.
- Лунев Б. С., Уткин Р. Е. К вопросу поисков мелкого золота.— В кн.: Аллювий. Вып. 2. Пермь, 1973, с. 116—130.
- Щербаков Ю. Г. Геохимические критерии представительности анализа пород и руд.— В кн.: Ядерно-геохимические методы. Новосибирск: Наука, 1976, с. 3—10.

Е. П. САПРЫКИН, Г. Ш. ЦИЦИАШВИЛИ

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКРЫТОГО ОЛОВЯННОГО ОРУДЕНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Предлагаемый метод является составной частью комплексной методики прогнозирования скрытого оловянного оруденения в месторождениях складчатой области Сихотэ-Алиня.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И МЕТАЛЛОГЕНИЯ РЕГИОНА

Складчатая область Сихотэ-Алиня включает три крупные структурно-фациальные зоны: главный антиклиниорий, главный синклиниорий и прибрежное антиклинальное поднятие. Регион в целом имеет двухъярусное строение: нижний ярус сложен осадочными и вулканогенно-осадочными толщами палеомезозойского возраста, собранными в крутые складки северо-восточного простирания; верхний — представлен пологозалегающими покровами кислых и среднеосновных вулканитов верхнемелового и палеогенового возраста, имеющими наибольшее распространение в восточной части региона.

Плутонические породы интрузивного облика представлены ультрабазитами, габброидами и гранитоидами. По периферии последних гравиметрией фиксируются на глубине обширные невскрытые plutоны.

Метаморфизм проявлен широко и неравномерно. Кроме контактовых ореолов, обрамляющих отдельные тела гранитоидов, известны обширные поля интенсивно метаморфизованных (биотитизированных) пород, не связанные с конкретными массивами. Наряду с этим документируются значительные площади, где изменения пород отвечают дозелено-сланцевой фации. Сводная колонна эндогенных преобразований состоит из трех основных зон: биотитовой, с роговиковой подзоной; гидрослюдисто-серицитовой; пропилитовой (хлорит, гидрослюды, кальцит, эпидот).

Глубинное строение региона характеризуется общим сокращением мощности земной коры по мере приближения к Японскому морю и наличием ряда внутренних выступов высокоплотного фундамента, но без значительных вертикальных амплитуд.

Для региона характерно наличие олова, а кроме того, известны месторождения полиметаллов и вольфрама. Оловорудные месторождения размещены главным образом в терригенных породах. Морфологически — это серии сближенных, субпараллельных крутопадающих трещинных зон небольшой (0,5—2 м) мощности протяженностью по латерали и вертикали в несколько сотен метров (до первых километров). На нижних горизонтах некоторых месторождений развиваются обширные нечеткие зоны прожилково-вкрапленного оруденения.

По вещественному составу руды полиметаллические. Кроме олова они содержат свинец, цинк, медь, мышьяк, серебро, вольфрам, некоторые — ртуть, молибден; в примесях — индий, кадмий и др.

Рудная минерализация (в порядке распространенности) представлена пирротином и пириитом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом и арсенопиритом, кассiterитом, станинитом, шеелитом, иногда вольфрамитом, киноварью. Жильная — соответственно кварцем, хлоритом, серицитом, турмалином, кальцитом, флюоритом, эпидотом. В рудопроявлениях грейзенового типа к ним добавляются топаз, мусковит, андалузит, апатит. Второстепенные месторождения характеризуются качественно тем же составом, но с явным преобладанием низкотемпературных парагенезисов.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОРУДЕНЕНИЯ

Оруденение не связано с деятельностью каких-то особых рудоносных растворов, а представляет собой частный случай миграции вещества в процессе эндогенных преобразований пород земной коры, объединяемых понятием «зональный плутонометаморфизм». Исходной предпосылкой, определяющей потенциальную рудогенерирующую способность этого процесса, является его неизохимичность в отношении рудных элементов. Многочисленные геохимические исследования последнего десятилетия показали, что метаморфизм во всех своих проявлениях и на всех стадиях сопровождается перемещением больших масс рудных элементов. В процессе плутонометаморфизма происходит изменение химического состава пород от зоны к зоне, что позволяет отождествлять его с региональным метасоматозом, кульминационная стадия которого — автохтонное гранитообразование.

Миграция рудных элементов происходит как в прогрессивный, так и в регressiveный этапы плутонометаморфизма. Соответственно формируются локальные гидротермалиты двух генетических групп, синхронные указанным этапам эндогенного процесса. Гидротермалиты первой группы, по существу, повторяют в уменьшенном виде строение полей и ореолов метаморфитов — региональных метасоматитов. Приуроченные к локальным, легко проницаемым участкам, дренирующим основную массу проходящих через данный блок пород растворов, они отличаются более интенсивной и контрастной переработкой пород и резко повышенной концентрацией рудных элементов. Глубинные (тыловые) зоны локальных гидротермалитов замещаются биотитом и другими метаморфическими новообразованиями. Выше, в пределах всего локального ореола, наблюдается тот же прогрессивный режим смены зон и минеральных ассоциаций, а его внешняя зона, в свою очередь, надвигается на метасоматиты регионального распространения. Таким образом, ореол локальных гидротермалитов оказывается как бы встроенным в колонну региональных изменений, составляя ее неотъемлемое звено. Локальные метасоматиты в крутопадающих телах жильной формы по сравнению с новообразованиями во вмещающих породах на том же гипсометрическом уровне всегда характеризуются более высокотемпературными минеральными парагенезисами, особенно в осевых зонах.

Гидротермалиты второй группы в общем случае представляют собой продукты более поздней (наложенной) переработки ранее метаморфизованных и магматотипных пород. По вещественному составу они весьма разнообразны, но при этом обнаруживают тесную сопряженность с предшествующими изменениями. Эта зависимость, носящая характер функциональной связи, выражается в том, что локальная минерализация, сформировавшаяся в данной зоне прогрессивного этапа, может быть представлена всеми или отдельными ассоциациями, слагающими внешние зоны, но никогда не встречаются ассоциации, отвечающие его внутренним (тыловым) зонам.

Разное положение гидротермалитов выделенных групп в цепи более общих эндогенных процессов придает им еще ряд специфических черт строения и условий образования. Они различаются:

а) взаимоотношением с региональными изменениями пород — составная часть единой колонны и наложенная на всех глубинах более низкотемпературная минерализация;

б) взаиморасположением областей питания и осаждения рудного вещества — вещество, мобилизованное из всех нижележащих толщ, включая мантию, и то же вещество, вовлеченнное в ретроградную миграцию и вновь мобилизованное из вышележащих толщ, что подтверждается данными изотопии;

в) морфогенетическими особенностями рудолокализующих трещинных структур — трещины скола, формирующиеся в обстановке сжатия, контракционные трещины отрыва;

г) степенью распространенности и положением жильных гидротермальных в колонне региональных изменений — первые развиваются только в сравнительно слабо метаморфизованных породах, еще не потерявших жесткости, вторые эшелонированно следуют на большую глубину, затухая только у «мертвой линии» Эммонса;

д) типами вертикальной зональности оруденения, метасоматитов, эндогенных ореолов и палеотемпературных полей — прямая и обратная зональность.

Основное различие состоит в том, что гидротермалиты 1-й группы формируются при восходящем движении растворов, а гидротермалиты 2-й группы формируются при их нисходящем движении. Разнонаправленная миграция влаги и микрокомпонентов в периоды разогрева и остывания вмещающей среды обусловлена физическим эффектом термовлагодиффузии, проявленным в геологических масштабах, что подтверждается, в частности, результатами проведенного нами полевого эксперимента по нагреванию больших масс горных пород в их естественном залегании [Сапрыкин и др., 1976].

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКРЫТОГО ОЛОВЯННОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Предлагаемая методика базируется на изложенной выше метаморфогенной концепции гидротермального рудогенеза, и прежде всего на представлении о существовании двух генетических групп гидротермалитов. Применительно к геологическим условиям Сихотэ-Алиня главная предпосылка состоит в том, что все крупные оловорудные месторождения региона, заключающие основную массу руд в коренном залегании, относятся к гидротермалитам 1-й группы со свойственной им прямой зональностью — распределения минеральных ассоциаций по вертикали. Они занимают вполне определенную геологическую позицию, располагаясь по периферии полей и оребров метаморфизованных пород. На площадях, занятых гранитами и метаморфитами (биотититами), развиты грейзеновые и другие высокотемпературные рудопроявления олова, обычно не имеющие в регионе промышленного значения. В пределах Сихотэ-Алиня к настоящему времени известно несколько сотен рудных тел и аномальных участков с неясной оловоносностью на глубине, среди которых могут быть обнаружены, как показывает опыт, и слабо эродированные гидротермалиты 1-й группы с глубокозалегающими оловянными рудами.

Методика прогнозирования в общем случае включает три этапа работ, имеющих своей целью последовательное выделение сначала большой площади скрытого оловянного оруденения, затем локальных участков и, наконец, конкретных рудных тел.

Разделение площадей (региональное прогнозирование). Все известные месторождения, как отмечалось выше, размещаются в верхней части колонны региональных изменений пород (в гидрослюдисто-серicitовой и пропилитовой зонах). В соответствии с этим к числу бесперспективных относятся выходы гранитоидов и площади, сложенные роговиками и биотитами. Разделение площадей осуществляется на основе составляемой карты метаморфической зональности территории и изучения сводной колонны региональных изменений пород.

Разбраковка локальных участков и рудопроявлений. Главной задачей на этом этапе является выделение низкотемпературных гидротермалитов 2-й группы, которые по вещественному составу практически не отличаются от первых. Для этого используются в основном три критерия: метаморфический, метасоматический и структурно-морфологический.

Сущность первого критерия заключается в том, что у гидротермалитов 2-й группы локальная минерализация (околожильный комплекс и метасоматиты самого рудного тела) по сравнению с изменениями площад-

ного распространения всегда представлена более низкотемпературными парагенезисами. В терригенных породах это соотношение чаще всего представлено зонами кварцево-серicitовохлоритовой минерализации среди поля или ореола слабо биотитизированных пород. Биотитизация в этом случае устанавливается только под микроскопом.

Гидротермалиты 2-й группы могут развиваться также в очень слабо измененных породах, и тогда первый признак становится неотчетливым. Для любых гидротермалитов этой генетической группы характерно широкое развитие в окорудном блоке пород процессов кремнекалиевого метасоматоза (окварцевания и серicitизации) с сопряженной или наложенной карбонатизацией. Физико-химическая суть этого критерия состоит в том, что контракционные трещины отрыва, вмещающие гидротермалиты 2-й группы, представляют собой лишь наиболее контрастное проявление общего разуплотнения пород на данном участке вследствие сокращения их объема при остывании. Фильтрация же растворов через разуплотненные участки силикатных пород всегда приводит к одному результату — выносу двухвалентных оснований и накоплению кремнезема и калия [Овчинников, Масалович, 1970; Сапрыкин, 1977, 1980].

Третий критерий, морфологический, выражается в разной ориентировке и невыдержанности жильных тел по простиранию и падению, что обусловлено теми же факторами — остыванием пород, сокращением их объема и возникновением многочисленных центров контракционной трещиноватости.

Если данное рудное тело или рудопроявление в целом по совокупности признаков отчетливо вырисовывается как гидротермалит 2-й группы и на выходе больших концентраций олова не содержит, то дальнейшему изучению (на глубину) оно не подлежит. Вследствие присущей всем гидротермалитам 2-й группы обратной вертикальной зональности с глубиной будет наблюдаться только снижение интенсивности оловянного оруденения, как более высокотемпературного.

Оценка на глубину отдельных рудных тел. Выделенные по результатам работ предыдущего этапа гидротермалиты 1-й группы также далеко не всегда несут на глубине оловянное оруденение. Среди них могут оказаться, например, существенно полиметаллические месторождения или отдельные рудные тела с низким содержанием олова на всех интервалах глубин. Поэтому задачей третьего, заключительного, этапа прогнозирования является разделение по степени оловянности генетически родственных объектов, находящихся в идентичной геологической обстановке.

Излагаемый ниже геохимический метод оценки на олово глубинных частей рудных тел заключается в определении степени однородности строения эндогенных ореолов в выбранных параметрах при слежении по линии опробования, пролегающей на поверхности. Операция слежения осуществляется с помощью ЭВМ по специально разработанному с этой целью алгоритму [Цициашвили и др., 1977]. Суть алгоритма состоит в задании для выбранных геохимических коэффициентов граничных значений, превышение которых при переходе от одной точки опробования к другой фиксируется как нарушение (срыв) однородности в строении эндогенного ореола.

Задачей обучения является нахождение критерия, различающего два класса геологических объектов (с промышленным и непромышленным оловянным оруденением на глубине). Для обучения было взято 13 объектов первого класса и 17 объектов — второго, представляющих собой участки рудных тел. Так как распознавание производилось по полупрофилям, то общее количество обучающих объектов увеличилось примерно вдвое, составив соответственно 24 и 31. В качестве геохимических коэффициентов использованы парные соотношения содержания ряда профилирующих элементов месторождений и их эндогенных ореолов: Sn, Pb, Zn, Cu, Ag, Bi.

Интерпретация материалов, полученных с ЭВМ, заключалась в составлении таблиц и графиков, иллюстрирующих степень сходства объек-

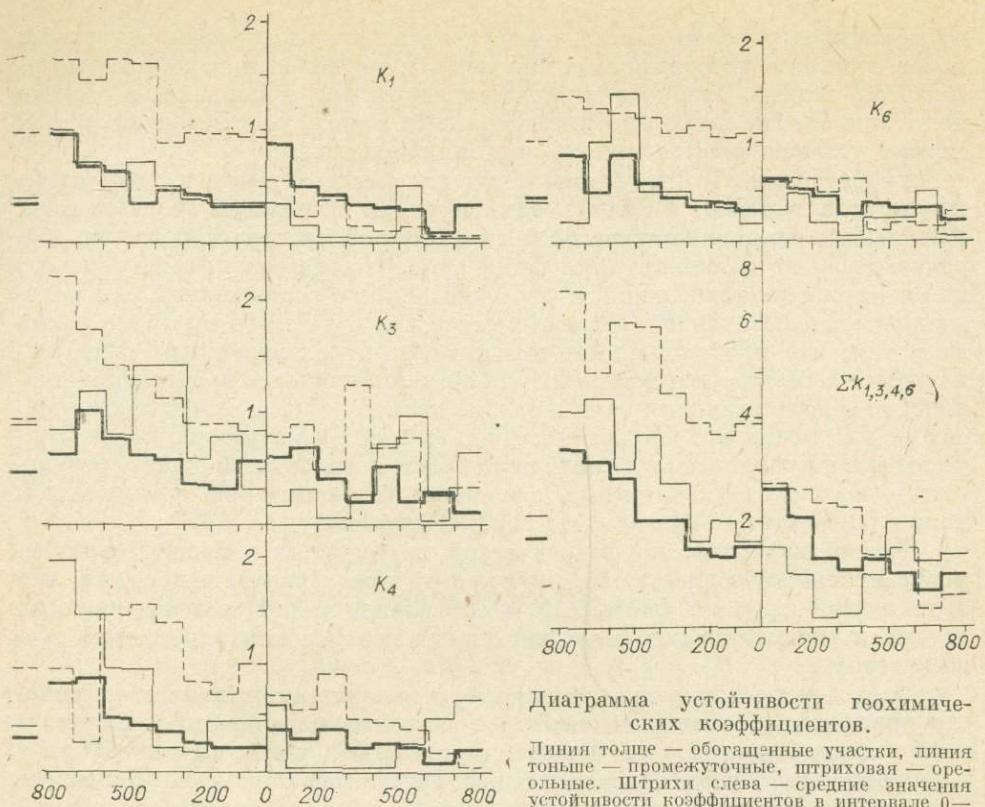


Диаграмма устойчивости геохимических коэффициентов.

Линии толще — обогащающие участки, линия тоньше — промежуточные, штриховая — однородные. Штрихи слева — средние значения устойчивости коэффициентов в интервале 0—500 м. По оси абсцисс показано расстояние от центра рудного тела (0—100 м и т. д.), по оси ординат — количество нулевых значений (срывов) однородности коэффициента на данном отрезке профиля. Стрелкой указано направление сложения: левая сторона диаграммы — от периферии ореолов к рудному телу, правая — в обратном направлении.

тов внутри класса и различий между классами. Из всех возможных комбинаций указанных элементов выявлено четыре надежно различающих коэффициента: K_1 — Pb : Zn; K_3 — Pb : Cu; K_4 — Zn : Sn; K_6 — Zn : Cu. Определено, что по этим коэффициентам промышленные участки характеризуются более однородным строением эндогенных ореолов (см. рисунок). Числовой показатель — количество «срывов» однородности на 500-метровый интервал линии опробования, примыкающей к рудному телу, — в первой группе объектов равен 2—3, а во второй — 4—6. Сравнение параметров по критерию Стьюдента — Фишера показало значимые различия по всем 100-метровым интервалам, в целом по профилю и по всем четырем коэффициентам.

Данный метод наряду с достоинствами имеет два существенных недостатка. Первый из них заключается в том, что различающая способность параметров сохраняется только при длине линии опробования 400—600 м. При большей длине происходит нарастание своеобразной усталости ЭВМ (?), вследствие чего многократно встречающиеся на предыдущих интервалах нарушения однородности в дальнейшем фиксируются уже как второстепенные срывы, а в качестве срывов первого порядка отмечаются только более контрастные неоднородности. Поскольку исчисление на ЭВМ производилось беспрерывно от начала до конца линии опробования и затем в обратном направлении (без остановки на рудном теле), то при обычной протяженности профилей 1—1,5 км максимальное различие получалось при прослеживании профиля от периферии ореола к рудному телу, т. е. в начальную стадию. Одной из причин несоответствия может быть то, что алгоритмом предусмотрена автоматическая регулировка граничных значений коэффициентов, отвечающих условию однородности геохимического поля в данной точке опробования, в зависимости от предыстории (степени

неоднородности этих же параметров), на пройденном отрезке профиля, которая по мере накопления срывов постепенно нарастает. В связи с этим рекомендуется длину геохимического полупрофиля в рабочем варианте принимать равной 400—600 м, при шаге опробования в 10 м проводить исчисление только в прямом направлении, т. е. от периферии к рудному телу.

Второй недостаток метода — ограниченность его применения при групповом расположении рудных тел, обладающих разной продуктивностью. Так, если в серии сближенных рудных тел хотя бы одно из них имеет промышленные параметры по олову, то влияние остальных рудных тел как бы перекрывается общим повышением однородности геохимического поля на данном участке. При значительном (400—500 м и более) удалении ореолы приобретают индивидуальность и диагностика второстепенных рудных тел становится возможной.

В заключение следует отметить, что данная методика не универсальна. Она предназначена для прогнозирования скрытого оловянного оруденения в месторождениях вполне определенного типа, где среди известных аналогов заключена основная масса оловянных руд. Обычно это круто-падающие трещинно-жильные тела и линейные зоны минерализации, относящиеся по нашей классификации к гидротермальным 1-й группы со свойственной им прямой вертикальной зональностью оруденения. Именно благодаря этой особенности они являются в настоящее время главным резервом пополнения и расширения оловорудной базы в районах с высокой геологической изученностью. Поэтому выполнение намеченной программы позволит с минимальными затратами решить следующую задачу: если на данной территории продуктивные на олово месторождения имеются, то они будут обнаружены и определены как таковые, или же однозначно будет установлено их отсутствие на доступных глубинах.

ЛИТЕРАТУРА

- Овчинников Л. Н., Масалович А. М. Состав, внутреннее строение и некоторые свойства гидротермального рудообразующего раствора.— В кн.: Проблемы метасоматизма. М.: Недра, 1970, с. 25—33.
- Сапрыкин Е. П. Поведение рудогенных элементов при метаморфизме.— Геол. журн., 1975, 35, вып. 1, с. 18—26.
- Сапрыкин Е. П. К вопросу о механизме миграции и осаждении вещества при метасоматозе и рудообразовании.— В кн.: Геология и магматизм Дальнего Востока. Владивосток, 1977, с. 114—118.
- Сапрыкин Е. П. Метаморфогенно-гидротермальное образование.— М.: Наука, 1980.— 167 с.
- Сапрыкин Е. П., Василенко Г. П., Мездрич Б. М. Миграция элементов в искусственном термоградиентном поле.— Геохимия, 1976, № 10, с. 1570—1576.
- Цициашвили Г. Ш., Мездрич Б. М., Пушкарь В. С. Математическое моделирование слоистых геологических образований.— Геол. и геофиз., 1977, № 5, с. 60—65.

СОДЕРЖАНИЕ

А. И. Гавришин, А. Корадини, М. Фулькиньони. Новый метод и комплекс программ на ЭВМ для классификации геохимических наблюдений	3
А. А. Шиманский, Н. А. Шиманская. Вероятностно-статистические аспекты опробования при геохимических поисках	7
Н. П. Орехов, В. И. Шарков, А. С. Пак. Опыт математической обработки геохимической информации в ПГО «Бурятгеология»	13
Л. А. Филиппова. Геохимические карты Хапчерангинского района (Забайкалье) по потокам рассеяния при различной плотности опробования	16
Э. Ф. Жбанов, В. И. Игнатович, В. С. Афанасьев. Результаты обработки на ЭВМ данных геохимической съемки Джидинского рудного района	22
Г. И. Менакер, Л. Н. Скорняков. Автоматизированная система обработки геохимических данных в ПГО «Читагеология»	25
Д. А. Родионов, Т. Ю. Сливак. Статистический метод выявления и ранжирования многомерных геохимических аномалий	29
Г. Л. Рубо, Л. Н. Гинзбург, С. И. Ашкиназе. Система обработки геохимической информации на ЭВМ ЕС	32
Э. Н. Поздняков. Информационное обеспечение автоматизированной системы обработки данных при геохимических поисках полезных ископаемых (АСОД ГППИ)	35
В. Н. Макаров, А. А. Селезнев, В. А. Тимченко, И. Н. Крицук, И. И. Силин. Региональная геохимическая карта Южной Якутии	40
Е. И. Зубов, Е. Б. Высокоостровская, А. И. Краснов, Д. С. Зеленецкий. Методика автоматизированной обработки аэрогеохимической информации на основе компонентного анализа	43
А. Д. Ананченко, И. И. Соин. Многомерный анализ геохимического поля при космоаэрогеологических исследованиях	49
П. В. Коваль, В. М. Якимов, В. И. Коваленко, В. А. Найгебауэр, Р. И. Дубов. Тренд-анализ химического состава раннемезозойских гранитоидов Монголии	54
В. Н. Бондаренко, Л. А. Верховская, А. М. Ронина. Выделение ассоциаций элементов-индикаторов в геохимическом поле с использованием линейной фильтрации	58
М. Д. Каргер, С. А. Сандомирский. Исследование зональности первичных геохимических ореолов на ЭВМ	63
А. А. Шиманский, П. Н. Райковский. Первичные ореолы медно-никелевых месторождений норильско-тальшакского типа	96
Н. А. Китаев, П. В. Богатырев. О количественной оценке геохимических полей	75
Р. И. Дубов, Н. М. Франковская, В. К. Кошелев, Б. А. Досанова. Количественный прогноз оруденения по геохимическим данным	85
И. И. Тарлинский, С. Г. Петровская, А. М. Спиридонов. Количественный прогноз оруденения методом физико-математического моделирования	91
Ю. Г. Шестаков, С. И. Леонтьев. О возможном пути повышения информативности литохимических данных при оценке рудных полей	94
А. И. Бураго, А. Н. Ивакин. Количественный прогноз оруденения по первичным литохимическим ореолам	98
Т. П. Аксенова, В. Г. Петров, Т. Е. Петрова. Возможности и результаты применения крупнообъемного опробования при региональных геохимических исследованиях	107
Е. П. Сапрыйкин, Г. Ш. Цициашвили. Геохимический метод прогнозирования скрытого оловянного оруденения с помощью ЭВМ	114

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Утверждено к печати Институтом геохимии
им. академика А. П. Виноградова СО АН СССР

Редактор издательства З. Д. Роскина
Художественный редактор М. Ф. Глазырина
Технический редактор Н. М. Бурлаченко
Корректоры Е. Н. Зимина, В. В. Борисова

ИБ № 23638

Сдано в набор 28.06.85. Подписано к печати 22.05.86. МН-01460. Формат 70×108^{1/16}. Бумага типографская № 3. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 10,8. Усл. кр.-отт. 11,1. Уч.-изд. л. 12,6. Тираж 1050 экз. Заказ № 797. Цена 1 р. 90 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука», Сибирское отделение.
63099, Новосибирск, 99, Советская, 18.

4-я типография издательства «Наука». 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.

УДК 550.42:519.24

Новый метод и комплекс программ на ЭВМ для классификации геохимических наблюдений. Гавришин А. И., Корадин А., Фулькиньон М. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Разработан многомерный статистический классификационный *G*-метод, основанный на критерии Z^2 . Предложено два основных варианта *G*-метода для классификации независимых наблюдений — способ средних параметров и способ ближайших точек.

Метод позволяет решать следующие главные задачи: строить классификацию многомерных геохимических наблюдений в условиях отсутствия априорных сведений о таксономической структуре наблюдений; оценивать величину сходства — различия между однородными классами; оценивать информативность признаков в созданной таксономической структуре; классифицировать новые наблюдения.

G-метод реализован в виде серии программ на языке FORTRAN для ЭВМ Минск-22, EC-10 — 22 и UNIVAC-1110.

Программы использованы для анализа поисковой и других видов геохимической информации (гидрогеохимической, литогеохимической, космохимической). Получены хорошо интерпретируемые результаты по гидрохимической зональности водоносных горизонтов, выделению первичных ореолов, классификациям лунных пород и стекол и т. д. Табл. 1, библиогр. 8.

УДК 550.84

Вероятностно-статистические аспекты опробования при геохимических поисках. Шиманский А. А., Шиманская Н. А. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Рассматривается вопрос вероятностных и статистических сторон геохимического опробования с целью использования их для повышения достоверности измерений. Библиогр. 6.

УДК 550.84

Опыт математической обработки геохимической информации в ПГО «Бурят-геология». Орехов Н. Н., Шарков В. И., Пак А. С. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Рассматриваются вопросы обработки геохимической информации на ЭВМ различными методами и интерпретация карт в ПГО «Бурятгеология».

УДК 550.84

Геохимические карты Хапчурангинского района (Забайкалье) по потокам рассеяния при различной плотности опробования. Филиппова Л. А. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Приводятся геохимические карты по потокам рассеяния Хапчурангинского рудного района, построенные при различной плотности опробования. На картах, составленных при плотности опробования 1—2 пробы на 1 км², надежно выявляются отдельные месторождения и типы их рудной минерализации, что является задачей поисковых работ. Показано, что общие закономерности размещения месторождений достаточно хорошо фиксируются на картах при плотности опробования 1 проба на 5 км², а крупные рудные площади (рудные районы, узлы и т. д.) будут выявляться при плотности 1 проба на 10 км² и меньше. Отмечается, что геохимические карты с малой плотностью опробования (1 проба на 5—10 км² и меньше) целесообразно составлять на первых этапах поисковых работ для слабо изученных территорий с неопределенными рудными перспективами. Ил. 5, библиогр. 7.

УДК 550.092

Результаты обработки на ЭВМ данных геохимической съемки Джидинского рудного района. Жбанов Э. Ф., Игнатович В. И., Афанасьев В. С. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

По результатам съемки по потокам рассеяния на площади 6000 км² построены геохимические карты. Ранее выделенные металлогенические зоны на монозлементных картах не отражены. Ил. 2, библиогр. 7.

УДК 550.84.053:681.3(571.55)

Автоматизированная система обработки геохимических данных в ПГО «Читагеология». Менакер Г. И., Скорняков Л. Н. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

В ПГО «Читагеология» эксплуатируется автоматизированная система обработки геохимических данных, ориентированная на обработку результатов литохимической съемки. Программное обеспечение системы по типу решаемых задач состоит из нескольких информационно связанных комплексов программ: подготовки и управления данными, описания геохимических объектов, сравнения и разграничения геохимических объектов, построения геохимических карт, классификации геохимических полей и объектов, специальных задач.

Система позволяет значительно снизить стоимость обработки геохимических данных, обрабатывать имеющуюся геохимическую информацию ПГО и получать качественно новую. Долговременный фонд системы содержит около 2 млн. проб.

УДК 550.84 : 550.8.05.519.24

Статистический метод выявления и ранжирования многомерных геохимических аномалий. Родионов Д. А., Спивак Т. Ю. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Рассматривается формальный метод выявления и ранжирования аномалий из исследуемого набора геологических объектов, представленных выборками наблюдений над комплексом признаков в ситуациях, когда априори отсутствуют сведения об объектах, являющихся эталонами для принятия классификационных решений. Задача сводится к проверке гипотезы о равенстве средних значений множества независимых случайных величин. Для такой проверки предлагается использовать параметрический критерий Джеймса и ранговый критерий Пурни—Сена—Тамуры. В случае ее отклонения непосредственно переходят к процедуре выделения аномалий. Для визуализации многомерных решений и упорядочения выделенных аномалий вводится скалярная величина. Библиогр. 4.

УДК 550.4:681.3

Система обработки геохимической информации на ЭВМ ЕС. Рубо Г. Л., Гинзбург Л. Н., Ашкиназе С. А. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Описывается логическая схема взаимодействия ряда программ, объединенных в одну систему, позволяющую проводить всестороннюю обработку геохимической информации. В описанную систему входят как программы, использующие основные идеи геохимических методов («Мульт», «Ряд»), так и программы, реализующие методы не-параметрической статистики («Порт», «Мэн»), многомерного статистического анализа («Класс», «Эффект»), факторного анализа («Фактор»), таксономии («Кластер»). Большинство результатов, выдаваемых этими программами, могут быть представлены в виде карт на АЦПУ или графопостроителе (программы серии «Карта»). Применение предлагаемой системы программ позволяет свести обработку исходной геохимической информации к изучению поведения небольшого количества характеристических показателей, функционально связанных со степенью неоднородности аномального геохимического поля. Изучение таких показателей также проводится с помощью программ, входящих в описанную систему. Библиогр. 3.

УДК 550.4:681.3

Информационное обеспечение автоматизированной системы обработки данных при геохимических поисках полезных ископаемых (АСОД ГППИ). Поздняков Э. И. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Комплекс программ ГЕОННАВТ, функционирующий на базе ЭВМ ЕС, предназначен для ввода, хранения, накопления и поиска первичных данных геохимического опробования исследуемых геологических объектов. Большое внимание удалено диагностике ошибок подготовки данных на машинных носителях (перфокартах, перфолентах, магнитных лентах) и приемам их оперативного исправления. Переписывания исходного документа на стандартные бланки не требуется.

Данные пользователя рассматриваются как набор поименованных совокупностей записей (макетов), имеющих некоторый смысл для пользователя. На основе хранимого набора макетов пользователь может формировать новые макеты, имеющие статус исходных. Без дополнительных затрат ГЕОННАВТ обеспечивает данными программы петрохимических пересчетов и автоматизированной диагностики минералов.

Комплекс рассчитан на массовое применение и управление диалоговыми средствами. Он обеспечивает передачу данных внешним программам и их защиту от несанкционированного использования. Табл. 1.

УДК 550.84.012:551.71(571.56)

Региональная геохимическая карта Южной Якутии. Макаров В. Н., Селезнев А. А., Тимченко В. А., Крицук И. Н., Силин И. И. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Создан комплект региональных геохимических карт Южной Якутии, включающий карты коренных пород, твердого стока (шихолитохимическая) и ионного стока (Гидробиогеохимическая). Обработка данных и построение карт проведены на ЭВМ ЕС-1020 методом многомерных полей. Установлены геохимические особенности территории Южной Якутии. Изучено распределение микрэлементов в материале твердого стока. Выделены геохимические ассоциации, характерные для основных геологических формаций региона. Определены перспективы ряда новых площадей.

Геохимическая карта представляет интерес для сельского хозяйства, медицины, охраны окружающей среды. Табл. 1, библиогр. 7.

УДК 550.053:519.2 (063)

Методика автоматизированной обработки аэрохимической информации на основе компонентного анализа. Зубов Е. П., Высокоостровская Е. Б., Краснов А. И., Зеленецкий Д. С. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Изложена методика автоматизированного составления полиэлементных радиогеохимических и прогнозных карт по материалам аэрогамасспектрометрической съемки, основанная на использовании компонентного анализа в прямой и обратной постановках.

Выполненная на основе предложенной методики прогнозная оценка двух районов докембрийской консолидации свидетельствует о существенной локализации перспективных площадей. Делается вывод о возможности предлагаемой методики при прогнозировании по аэрохимическим данным месторождений полезных ископаемых. Ил. 3, табл. 3, библиогр. 8.

УДК 681.3.06:550.84.09:528.77(202)

Многомерный анализ геохимического поля при космоаэрогеологических исследованиях. Аナンченко А. Д., Сонин И. И. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Приводятся данные по составлению геологических структур, выявленных с помощью финансирования космических снимков и геохимического картирования с обработкой данных методом многомерных полей, разработанных в Вычислительном центре Иркутского госуниверситета в сотрудничестве с Институтом геохимии СО АН ССР. Все космогеологические объекты, выявленные в результате дешифрирования и комплексных наземных работ, коррелируются с контрастными аномалиями геохимических ассоциаций, отчетливо отражающими формационно-генетические особенности процессов рудообразования. Ил. 2, библиогр. 6.

УДК 551.1:543.6(519.3)

Тренд-анализ химического состава раннемезозойских гранитоидов Монголии. Коваль П. В., Якимов В. М., Коваленко В. И., Найгебауэр В. А., Дубов Р. И. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

При региональных исследованиях раннемезозойских гранитоидов Монголии распределение химических составов аппроксимировалось параболической функцией. Показано, что последовательная аппроксимация при возрастающем порядке параболы оценивает глобальные, региональные и локальные составляющие геохимического поля. Последовательное изменение радиуса автокорреляции позволяет выявить закономерные составляющие геохимического поля, отображающие различную роль глобальных (ювелирных) и региональных (коровых) факторов в его строении. Тренд-анализ позволяет проводить независимую формализованную оценку моделей геохимического поля. Ил. 7, библиогр. 19.

УДК 550.4:519

Выделение ассоциаций элементов-индикаторов в геохимическом поле с использованием линейной фильтрации. Бондаренко В. Н., Верховская Л. А., Ронина А. М. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Предложен критерий фильтрации геохимических данных. Продемонстрирована эффективность фильтрации для выделения ассоциаций элементов-индикаторов и оконтуривания аномалий методами многомерной статистики. Ил. 2, библиогр. 10.

УДК 550.84.092.1:519.272.

Исследование зональности первичных геохимических ореолов на ЭВМ. Карапер М. Д., Сандомирский С. А. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Рассматривается модель геохимической изменчивости первичных ореолов, согласно которой она складывается из трех взаимосвязанных — зональной, масштабной и шумовой, обусловленной индивидуальными геохимическими особенностями конкретных ореолов. На базе этой модели формулируется задача количественного определения по единственному сечению ореола расстояния до некоторого начала отсчета в рудном теле и длины рудного тела. Такая постановка созвучна задаче регрессии внутриореольных расстояний и длины рудных тел на функции геохимических признаков, отражающие свойства зональной и масштабной составляющих геохимической изменчивости. Основой для выбора регрессионной модели служит модель фильтрации рудоносного раствора в изотропной среде. Разработан регрессионный алгоритм, реализующий принцип последовательного совмещения признаков на плоскости, так как обычный аппарат регрессионного анализа неприменим из-за того, что число наблюдений в данной задаче соизмеримо или даже меньше числа признаков. Алгоритм реализован в виде программы на языке Фортран IV для ЕС ЭВМ. Методика опробована на месторождениях. Ил. 5, библиогр. 5.

УДК 550.84

Первичные ореолы медно-никелевых месторождений порильско-талнахского типа. Шиманский А. А., Райковский П. Н. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Рассмотрены особенности строения первичных ореолов рассеяния сульфидных месторождений Норильского рудного района на основе изучения их методом многомерных полей. Показано, что формирование рудоносных интрузий, рудных тел и эндогеных ореолов происходит в узко локализованной зоне, ограниченной экранами. Это позволяет по-новому оценить роль первичных ореолов рассеяния при поисках сульфидного оруденения. Ил. 1, библиогр. 5.

УДК 550.84:553:044

О количественной оценке геохимических полей. Китаев Н. А., Богатырев П. В. Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Показан один из возможных путей количественной оценки геохимических полей с использованием метода многомерных полей (МП). Ил. 1, табл. 3, библиогр. 19.

Количественный прогноз оруденения по геохимическим данным. Дубов Р. И., Франковская Н. М., Кошелев В. К., Досанова Б. А.
Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Разработаны методы для максимального извлечения полезной информации из геохимических данных на различных этапах съемок.

При первом исследовании территории и поиске месторождений неизвестных до этого вида используется специальный комплексный показатель, который отражает отклонение наблюденных значений от фоновых в многомерном пространстве признаков, взвешенное по его связи с рудообразующими элементами и рыночной цене элементов.

При наличии обучающего материала предлагается использовать метод оптимизированной оценки количества руд и глубин их залегания по геохимическим и другим геологическим наблюдениям. Ил. 3, библиогр. 3.

Количественный прогноз оруденения на глубину при построении разрезов и карт. Тарлинский И. И., Петровская С. Г., Спиридонов А. М.
Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1985.

Применение принципов композиционного математического моделирования позволило создать дискретный аналог модели формирования рудного тела и его первичного ореола. Данная модель положена в основу разработанных программных средств, используемых в целях интерпретации распределения химических элементов в рудной зоне и прогнозирования оруденения на глубину по результатам геохимического опробования надрудных сечений первичных ореолов. Ил. 2.

О возможном пути повышения информативности литохимических данных при оценке рудных полей. Шестаков Ю. Г., Леонтьев С. И.
Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Предлагается метод использования материалов литохимических съемок прошлых лет для оценки изучаемых рудных полей. Обработка данных предусматривается с помощью ЭВМ на основе использования комплексных показателей. Апробация предлагаемого метода проведена на материалах литохимической съемки по одному из золоторудных районов. Выявлены участки возможного развития слепого оруденения. Ил. 2, табл. 1, библиогр. 4.

Количественный прогноз оруденения по первичным литохимическим ореолам. Бураго А. И., Ивакин А. Н.
Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

На основе обобщенной модели оруденения разработаны методы количественной оценки оловорудных и других объектов, в соответствии с которыми задачи количественного прогнозирования могут решаться в одно-, двух- и трехмерном пространстве. Ил. 6, библиогр. 5.

Возможности и результаты применения крупнообъемного опробования при региональных геохимических исследованиях. Аксенова Т. П., Петров В. Г., Петрова Т. Е.
Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Разработанная методика представляет возможность анализировать большие массы вещества (0,5—2 кг) тех фракций, в которых при дроблении пробы происходит преимущественная концентрация крупных золотин или хрупких золотосодержащих сульфидов, что резко повышает достоверность анализа. Ил. 2, табл. 1, библиогр. 7.

Геохимический метод прогнозирования скрытого оловянного оруденения с помощью ЭВМ. Сапрыкин Е. П., Цициашвили Г. Ш.
Математическая обработка геохимических данных.— Новосибирск: Наука, 1986.

Излагаются методы прогнозирования скрытого оловянного оруденения применительно к геологическим условиям Сихотэ-Алиня. Даны кратко геология региона, строение, вещественный состав и генезис оловорудных месторождений. Сделан вывод, что оруденение представляет собой частный случай миграции вещества в прогрессивный и регрессивный этапы плутонометаморфизма. Различия в генезисе оловорудных месторождений как локальных продуктов указанных этапов использованы в качестве критериев разделения по степени перспективности скрытого оруденения больших площадей и локальных участков. Для оценки на глубину конкретных рудных тел разработан геохимический метод прогнозирования с помощью ЭВМ, учитывающий особенности строения эндогенных ореолов над рудными телами с различной оловоносностью. Ил. 1, библиогр. 6.

1 р. 90 к.

4614



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ