

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
ПОИСКОВ
РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Часть I

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ им. академика А. П. Виноградова

СИБИРСКАЯ СЕКЦИЯ МЕЖДУВЕДОМСТВЕННОГО СОВЕТА ПО ПРОБЛЕМЕ
«НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ»

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ЧАСТЬ 1

Ответственный редактор

д-р геол.-мин. наук *В. В. Поликарпочкин*

3475



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Новосибирск • 1981



Геохимические методы поисков рудных месторождений. Часть 1. — Новосибирск: Наука, 1981.

Представлены проблемные статьи многих ведущих советских геохимиков, характеризующие в целом современное состояние, основные направления и перспективы дальнейшего развития прикладной геохимии в нашей стране. Освещены новейшие подходы и аспекты использования геохимических методов при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых в разнообразных природных обстановках.

Книга предназначена для научных работников геолого-геохимического профиля, геохимиков, геологов-поисковиков и разведчиков, преподавателей и студентов геологических вузов.

Редакционная коллегия:

*А. Е. Гапон, С. В. Григорян, В. А. Загоскин (зам отв. ред.),
Е. М. Квятковский, И. С. Ломоносов, А. П. Соловов,
Л. А. Филиппова, А. А. Шиманский.*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из выдающихся достижений советской геологии и геохимии является разработка и практическое применение геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

В результате работ этими методами в СССР открыты десятки рудных месторождений, в том числе крупнейших по заключенным в них запасам металлов, и в различных районах страны выявлены перспективные площади, составляющие резерв для дальнейшего роста минерально-сырьевой базы страны. Широкое применение геохимические методы поисков нашли и за рубежом.

Основателем геохимических методов поисков является Н. И. Сафронов. В начале 30-х годов, будучи еще совсем молодым человеком, он предложил идею геохимических методов поисков, основанную на первичном и вторичном рассеянии рудных веществ, и вместе с группой сотрудников провел первые успешные практические работы. Уже в то время работы Н. И. Сафронова получили горячую поддержку академиков А. Е. Ферсмана и С. С. Смирнова. Впоследствии он выдвинул еще целый ряд основополагающих идей и написал фундаментальные работы по геохимическим методам поисков и в сопредельной области их с геофизикой.

В предвоенные годы началось производственное применение геохимических методов, а сразу же после войны оно было значительно расширено. Резкий скачок был сделан в 1955—1956 гг., когда в результате мер, принятых Министерством геологии СССР, началось внедрение геохимических методов в работы всех поисковых и разведочных партий и экспедиций. В настоящее время проведение геологоразведочных работ не мыслится без применения геохимических методов поисков. Более того, можно сказать, что сейчас они являются самыми результативными из всех поисковых методов, находящихся на вооружении геологов.

Несмотря на успехи, развитие геохимических методов осложнялось определенными трудностями. Серьезные вопросы стоят перед нами в этой области и в настоящее время. Речь идет о том, чтобы путем преодоления трудностей значительно повысить эффективность применения методов.

Этой цели в основном и служит настоящий сборник. Редколлегия обратилась к ведущим специалистам Советского Союза по геохимическим методам поисков и к лицам, располагающим новыми интересными материалами, с просьбой написать статьи для сборника. При этом не было предложено какой-либо определенной, наперед заданной темы. Имелось в виду, что авторами сборника будут освещены темы важные, представляющие наибольший интерес согласно их точке зрения. Насколько значительной получилась работа — судить читателю.

Собранные материалы предполагается издать в двух книгах (частях). Н. И. Сафронов представлен в сборнике двумя статьями. Одна из них представляет перепечатку его статьи, опубликованной в 1936 г. Эта классическая статья, в которой было предложено понятие об ореолах рассеяния, являющееся в настоящее время важнейшим инструментом поисковых работ, не утратила своего значения до нашего времени и звучит так же свежо, как в тот год, когда она вышла в свет. Сборник, где она опубликована впервые, давно стал библиографической редкостью, и поэтому наша публикация статьи будет полезной. Вторая статья Н. И. Сафронова является его новейшей работой и посвящена проблеме энергии рудообразования, которую он успешно исследует. Она написана специально для данного издания.

К ВОПРОСУ ОБ «ОРЕОЛАХ РАССЕЯНИЯ»
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья имеет своим назначением предварительное и краткое ознакомление с «ореолами рассеяния» месторождений и методикой их использования в поисковых целях, как это представляется в настоящее время.

Материалами к этой статье послужили литературные сведения, общетеоретические соображения и, главным образом, результаты опытных полевых работ и лабораторных исследований, сделанных в последнее время геофизическим сектором ЦНИГРИ, где теме «ореолов рассеяния» уделяется большое внимание, а в 1936 г. она намечена к всестороннему изучению.

В соответствии с изложенным ниже приводятся лишь основные сведения и соображения в разрезе проекта темы 1936 г. Толчком к постановке соответствующих опытных и исследовательских работ в рассматриваемом разрезе послужили трудности, с которыми пришлось столкнуться при проведении широких электроразведочных работ на полиметаллических месторождениях Рудного Алтая в 1931—1932 гг. Результат этих работ и позволил сформулировать начальные задачи, стоящие на пути общего совершенствования геофизических поисков сульфидных месторождений (см. статью Н. И. Сафронова и П. Ф. Радионова в «Проблемах советской геологии», № 4, 1933 г. и более позднюю статью Н. И. Сафронова «Пути комплексной геофизической разведки сульфидов», напечатанную в «Известиях ЦНИГРИ», № 1, 1936 г.).

Успешные результаты отдельных опытных исследований на различных месторождениях подтвердили правильность выбранной линии развития и ее перспективность. Примерами таких исследований в настоящий момент могут служить промеры концентрации свободной серной кислоты в наносах с помощью избирательных электродов, произведенные А. П. Солововым и Н. Н. Сочевановым на Алтае в 1932 г.; П. Ф. Родионовым на Урале в 1933 г.; Н. Н. Сочевановым на Южном Урале (район Гая) в 1934 г.; Н. И. Сафроновым на некоторых месторождениях Южной Карелии в 1934 г. и И. С. Сидоровым на месторождениях Ак-Тюз и Буурду в Северной Киргизии в 1935 г., а также промеры концентрации меди в наносах и растениях, произведенные Н. Н. Сочевановым в том же районе Гая в 1934 г.

Особенно показательными исследованиями, направленными к определению концентрации касситерита в наносах вблизи оловорудных жил, являются опыты А. П. Соловова, произведенные им на Хапчерангинском месторождении олова в 1934 г., и производственные станнометрические

* Перепечатано из журнала «Проблемы советской геологии», 1936, т. 6, № 4, с. 302—322.

съемки на Хапчеранге и Шерловой горе, осуществленные на базе спектроанализа на олово А. П. Солововым и Н. И. Сафроновым в 1936 г.

Аналогичными по результатам являются работы А. Г. Линькова по применению борометрической съемки на Индерских месторождениях бора в 1935 г. Одновременно в физико-химической лаборатории геофизического сектора ЦНИГРИ в 1935 г. под руководством Е. А. Сергеева и С. Д. Миллера производилась разработка вопросов отбора проб грунтовых электролитов с помощью электродиализа; там же осуществляется модель полевого полярографа типа Гейровского — Шиката для анализа этих электролитов; разрабатывается портативная модель полевых избирательных электродов для промеров концентрации серной кислоты непосредственно в грунте и даются законченные методические основы борометрической съемки. Этим кладутся прочные основы конструкций полевой аппаратуры и методики.

Таким образом, в настоящий момент вопросы, поставленные еще в 1931 гг., могут считаться в основном разрешенными положительно, чем создаются предпосылки к широкому применению в поисково-разведочных целях методик, основанных на использовании продуктов вторичных изменений месторождений.

2. ОБЩИЕ ОБОСНОВАНИЯ «ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ»

В табл. 1 приведены основные сведения относительно вторичных изменений главнейших первичных и супергенных рудных минералов, претерпеваемых ими в условиях пояса выветривания.

При этом в таблицу вошли наиболее типичные минералы — представители двух крайних полюсов всего ряда рудных минералов, а именно,

Таблица 1

Наименование минералов	Состав	Главные агенты вторичного изменения	Наиболее обычные продукты вторичных изменений
Сульфиды железа	Fe; S	O; H ₂ O	Гидроокиси железа; сульфаты железа; свободная серная кислота
а) Пирит	FeS ₂	O; H ₂ O	То же
б) Пирротин	FeS	O; H ₂ O; H ₂ SO ₄ ; Fe ₂ (SO ₄) ₃	То же, сероводород
Сульфиды меди	Cu; S; Fe	O; H ₂ O; H ₂ SO ₄ ; Fe ₂ (SO ₄) ₃	Сульфат меди; гидроокиси железа; сульфаты Т; свободная серная кислота; при наличии карбонатов — водные карбонаты меди
а) Халькопирит	Fe; Cu; S ₂	O; H ₂ O энергично при H ₂ SO ₄ и Fe ₂ (SO ₄) ₃	То же
б) Борнит	Cu ₅ FeSO ₄	То же	»
в) Халькозин	Cu ₂ S		
г) Ковеллин	CuS		
Сульфат цинка (сфалерит)	ZnS	O; энергично при Fe ₂ (SO ₄) ₃	Сульфат меди Сульфат цинка
Сульфид никеля (пентландит)	NiFeS	O; H ₂ SO ₄ ; Fe ₂ (SO ₄) ₃	Сульфат никеля; сульфаты железа; гидроокиси железа; сероводород
Касситерит	SnO ₂	—	Устойчив
Хромит	FeCr ₂ O ₄	—	»
Минералы группы вольфрамит (вольфрамит, ферберит, гюбнерит, шеелит)	(Fe, Mn, Ca)WO ₄	—	Устойчивы; новообразования практически малозначущие
Молибденит	MoS ₂	—	То же
Золото	Au	—	Устойчиво

Сравнительная растворимость сульфатов некоторых металлов в воде (по Эммонсу)

Наименование и состав	Растворимость, г/л	Примечание
Сульфат цинка $ZnSO_4$	531,2	При 18°C
Сульфат никеля $NiSO_4$	274,8	При 18°C
Сульфат меди $CuSO_4$	172,0	При 20°C

с одной стороны — наиболее легко дающие вторичные продукты и, с другой — наиболее устойчивые в зоне выветривания.

Сведения приведены в основном согласно В. Эммонсу («Вторичное обогащение рудных месторождений», табл. 1).

К этой таблице может быть добавлено в качестве обобщения, необходимого нам для дальнейшего, следующее:

1. Ряд главнейших сульфидных рудных минералов полиметаллических месторождений (сульфиды железа, меди и цинка), а также промышленно чрезвычайно важный сульфид никеля — в зоне выветривания легко дают, в качестве новообразований, свободную серную кислоту и сульфаты соответствующих металлов.

Значительной растворимостью указанных сульфатов в воде, явствующей из нижеприведенной табл. 2, наряду с особой устойчивостью этих соединений в зоне окисления, легко объясняются установленные практикой факты миграции таких металлов, как медь, цинк, никель из зоны железной шляпы, приводящие в целом ряде случаев к почти полному отсутствию этих металлов в железной шляпе сульфидных месторождений, при несомненном наличии их в составе первичных руд.

Образующейся свободной серной кислоте обязаны своей кислотностью, иногда чрезвычайно значительной (например, Блява), грунтовые воды и наносы вблизи окисляющихся сульфидных рудных тел.

2. Рудные минералы, по химизму относящиеся, главным образом, к кислородным соединениям металлов и в практическом отношении являющиеся важнейшими для извлечения таких ценных металлов, как олово, вольфрам и хром, а наряду с ними самородное золото, принадлежат к числу минералов, особо устойчивых в зоне выветривания. Практическим доказательством этого являются широко известные факты концентрации этих минералов в россыпях. По-видимому, к подобному типу принадлежит и молибденит.

Что касается остальных минералов всего рудного ряда, то они, в смысле вторичных изменений в зоне выветривания, целиком укладываются внутри двух крайних рассмотренных полюсов.

В качестве примера остановимся на галените, учитывая его большую практическую значимость как главного минерала свинцовых руд. Этот минерал, в значительных кусках и блоках, является весьма устойчивым в зоне окисления, поскольку легко образующаяся корка трудно растворимого карбоната свинца предохраняет его от дальнейших изменений. В связи с этим стоят многочисленные факты находок глыб и кусков галенита в элювии вблизи галенистых месторождений. Однако в случае предварительного разрыхления и раздробления кусков галенита в результате механического выветривания и при продолжительности периода химического выветривания весь галенит превратится в карбонат свинца и сможет даже быть вынесен растворами непосредственно из зоны железной шляпы.

Аналогичным образом рассмотрим изменения в зоне выветривания первичных породообразующих (они же являются в основном и жильными) минералов. Среди них внимание обращено лишь на главнейшие, т. е. на наиболее распространенные в горных породах литосферы, как это следует из табл. 3.

Сравнительное распространение породообразующих минералов
(по Кларку и Вашингтону)

Наименование минералов	Общий состав	Участие в земной коре в % (округленно)	Наименование минералов	Общий состав	Участие в земной коре в % (округленно)
Полевые шпаты	Алюмосиликаты К, Na и Ca	58,0	Кварц	SiO ₂	12,5
Амфиболы, пироксены, минералы группы оливина	Мета- и ортосиликаты Fe, Mg, Ca	16,0	Слюды	Сложные силикаты К, H, Al, Mg, Fe и др.	3,0

Интересующие нас сведения изложены в табл. 4. К этой таблице может быть добавлено в качестве обобщения, необходимого нам для дальнейшего, следующее.

1. Важнейшим новообразованием на месте полевых шпатов и слюды — минералов, составляющих 61% средней горной породы, — является каолинит. Минерал образуется в чрезвычайно мелких чешуйчатых частичках. Благодаря этому обстоятельству каолинит может легко вымываться даже медленно перемещающимися водными потоками, давая коллоидальные растворы со всеми их свойствами (например, способностью коагулировать с иными зольями или катионами электролитов). В этом же состоянии каолинит может выноситься прочь с места своего образования, причем на значительные расстояния. В этом отношении имеет решающее значение тот факт, что взвешенные в водной среде частички, начиная с размеров в 0,01 м, практически уже не осаждаются, разве только под влиянием особых факторов или в исключительно спокойных бассейнах.

Наряду с этим каолинит в совокупности с иными новообразованиями (например, кремнекислотой, гидратами окиси железа и т. п.), а также с механически мелко издробленными (ниже известных пределов) частицами неизмененных горных пород и минералов составляет особый минеральный комплекс, который в силу своеобразных свойств получил в почвоведении специальное название минерального или цеолитного поглощающего комплекса. Своеобразные свойства этого комплекса выражаются прежде всего в способности к значительной адсорбции катионов электролитов, в частности катионов тяжелых металлов.

В этом отношении показательны опыты, проделанные физико-химической лабораторией геофизического сектора ЦНИГРИ (С. Д. Миллер)

Таблица 4

Сводные данные об изменениях
наиболее распространенных первичных породообразующих минералов
в зоне выветривания (согласно Хольмсу и Кравкову)

Наименование минералов	Состав	Главные агенты вторичного изменения	Наиболее обычные продукты вторичных изменений
Ортоклаз	KAlSi ₃ O ₈	H ₂ O; CO ₂	Каолинит; K ₂ CO ₃ ; кремнекислота
Плагиоклаз (анортит)	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ KH ₂ (R''', R'') ₃ Si ₃ O ₁₂ R'''=Al FeR''=Mg	То же H ₂ O; O; CO ₂	Каолинит; CaCO ₃ Каолинит; гидраты окиси железа; R'''CO ₃
Амфиболы, пироксены	Для наиболее простых R''SiO ₃ ; R''= =Ca; Mg; Fe; SiO ₂	То же	Гидраты окиси железа; кремнекислота; R'''CO ₃
Кварц			Устойчив к зоне выветривания

в 1935 г., которые указывают, что поглотительная способность некоторых природных глин, что, по существу, отвечает нашим понятиям «минерально-го поглощающего комплекса», по отношению к катиону меди в сульфатных растворах, выражается цифрами, в 35 раз превышающими количественные средние содержания этого металла в рудничных водах.

Добавим, что факты значительного поглощения глинами свободной серной кислоты широко известны и используются в промышленных целях.

Указанные явления представляются весьма важными с точки зрения формирования и закрепления некоторых «ореолов рассеяния».

2. Образование карбонатов щелочных и щелочноземельных металлов при вторичных изменениях породообразующих минералов имеет большое место. Это явление, в совокупности с поступлением углекислоты, идущей на образование легко растворимых бикарбонатов, способно повести в подходящих условиях к почти полному выносу в растворах К, Са, Mg из зоны вторичных изменений данной породы, что в свою очередь поведет к уменьшению количества вещества, остающегося на месте.

3. В процессе выветривания первичных горных пород, понимая под этим как процессы химического изменения, так и физического разрыхления, при наличии дренажа, без сомнения, имеет место общее уменьшение выветриваемой породы по сравнению с исходным ее объемом, обязанное выносу наиболее мелких частиц во взвешенном состоянии.

Этот факт имеет также важное значение при формировании определенных типов «ореолов».

3. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОБРАЗОВАНИИ «ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ»

К представлениям об образовании «ореолов рассеяния» мы можем прийти на основании рассмотрения следующего частного случая.

Допустим, что в равномерно-пористой напитанной водой безграничной среде находится рудное тело, по форме представленное бесконечно-длинным круговым цилиндром с радиусом сечения r_0 . Пусть на поверхности этого тела всюду протекает процесс окисления. Положим, что продукты этого процесса представлены легко растворимыми в воде какими-либо солями, например, сульфатами металлов, и с одинаковой скоростью образуются на всей поверхности окисляющегося тела. Последнее равнозначно предположению, что с каждого квадратного сантиметра боковой поверхности цилиндра ежесекундно переходит в раствор одинаковое количество растворимой соли. Обозначим это количество через q_0 г/с·см².

Положим, что внутри среды не происходит ни аккумуляирования, ни добавочного выделения продуктов, аналогичных продуктам окисления. Это соответствует отсутствию у среды поглотительных свойств и наличию только одного окисляющегося тела.

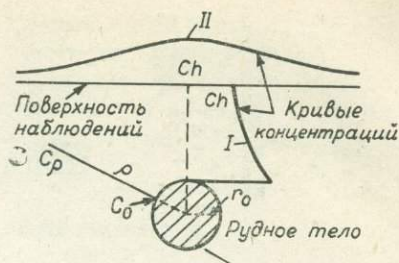
Кроме того, будем считать процесс в общем стационарным, т. е. от времени не зависящим.

В этих условиях должна иметь место диффузия, скорость которой выражается законом Фикка:

$$dq = ds \cdot dt \cdot \frac{dC}{dn} \cdot D, \quad (1)$$

где ds — элемент поверхности, выделенный в среде; dt — элемент времени; $\frac{dC}{dn}$ — градиент концентрации по нормали к элементу; D — константа диффузии (количество веществ, проходящее в секунду через 1 см², если разность концентраций равняется 1); dq — количество вещества, проходящее через ds в элемент времени dt .

Рис. 1. Схема распределения концентраций, в частном случае, изотропной диффузионной среды. Разрез вкрест простирания «рудного тела».



Решение уравнения (1) имеет в цилиндрических координатах вид:

$$C_{\rho} = C_0 + \frac{q_0 r_0}{D} \ln \bar{\rho}. \quad (2)$$

Здесь C_{ρ} — концентрация в произвольной точке; $\bar{\rho}$ — радиус-вектор этой произвольной точки; C_0 — концентрация в жидкой фазе у поверхности тела.

Схематически вид кривых, отвечающих уравнению (2), изображен на рис. 1. Здесь кривая I изображает изменение концентрации диффундирующей соли в среде вдоль по какому-либо радиусу-вектору ρ , а кривая II — то же изменение концентрации вдоль по линии вкрест оси тела и проложенной в плоскости на высоте h над осью цилиндра.

Как мы видим, кривая концентрации II имеет общий подъем в зоне над рудным телом с максимумом в эпицентре.

Реальный случай окисления рудного тела на границе коренных пород и пористых влажных наносов вполне может быть уподоблен, по качественному эффекту, только что рассмотренному примеру. И в этом последнем случае, перемещаясь по поверхности земли вкрест рудного тела, мы сможем и должны, применяя реакции соответствующей чувствительности и соответствующую методику взятия проб, установить зону повышенных концентраций мигрирующих элементов с максимумом в эпицентре залежи.

Природные условия несомненно внесут известные нарушения в теоретический ход кривых. Так, адсорбция электролитов поглощающим комплексом поведет к более резкому спаданию кривой концентрации I, чем это следует из уравнений (2); наличие испарения по поверхности раздела земля — воздух поведет к несколько более резкому проявлению зоны максимумов на кривой II; движение подземных вод сможет деформировать всю кривую II и повести к смещению максимума концентрации из эпицентра; создается необходимость вести наблюдения на некоторой глубине от поверхности, в силу поверхностного дренажа и наличия изменчивого почвенного слоя и т. д. Однако качественный характер эффекта несомненно сохранится.

Указанное уже позволяет сделать первое определение, касающееся понятий «ореолов рассеяния». Именно под «солевым ореолом рассеяния» понимается зона элювия — делювия, а в некоторых случаях и аллювия, обогащения ценным или характерным для месторождения элементом, при состоянии его в жидкой фазе в виде растворимых солей.

В качестве следующего примера рассмотрим непосредственно поведение в зоне выветривания жильного тела, представленного устойчивыми минералами (например, кварцем и касситеритом) и залегающего в «средней породе», отвечающей вышеприведенным данным. Рассмотрение поведем с момента, когда угол падения склона стал меньше угла естественного откоса (рис. 2).

По прошествии некоторого времени на склоне образуется слой элювия — делювия мощностью h . Имея в виду обычно наблюдаемое на склонах, в силу износа водными потоками мелких частиц, уменьшение объема исходного материала, положим, что первоначальная мощность первичной



Рис. 2. Схема образования «механического ореола». 1 — участок жилы, дающий россыпь; 2 — россыпь жилы; 3 — выветрелая (дезинтегральная) часть жилы.

породы была H . При этом как h , так и H для ясности будем полагать конечными, но достаточно малыми.

Так как вещество жилы, сравнительно с веществом обычной горной породы, не изменяется в зоне выветривания химически, а в силу большей устойчивости, кроме того, дает более крупный древесный материал при физическом выветривании, то мы можем считать, что весь «освобождающийся» объем жилы остается на месте. Однако он, начиная с некоторой высоты ($H - h$), не сможет удерживаться в виде гребня, а даст россыпь, профиль которой будет определяться двумя факторами: во-первых, стремлением принять угол естественного откоса и, во-вторых, приспособлением к кривой гидросноса. Поэтому жильный материал в виде более тонких частиц и в меньшем количестве будет распределяться вдали от эпицентра; обратно, его общее количество будет возрастать к эпицентру, достигая максимума над самым выходом жилы. Реальные природные условия, конечно, внесут соответствующие коррективы в изложенную идеальную схему. Так, без сомнения, под влиянием целого ряда факторов, как-то: почвообразования, привноса измельченного материала извне (с верха склона), гравитационной дифференциации в вязкой среде и т. д., будет происходить перемешивание жильного материала с пустым элювием, что, наряду с непрерывно продолжающимся процессом физического выветривания (измельчения) жильного материала, в конечном итоге поведет к отсутствию непосредственно видимых жильных признаков как на самой дневной поверхности, так и в наносах на глубине, заставляя тем самым прибегать для их обнаружения к помощи весьма деликатных и точных приемов. Наконец, возможное оползание элювия — делювия по склону сможет в значительной степени нарушить положение свалов, в особенности их максимума, относительно эпицентра жилы. Однако качественный характер явления обязательно будет иметь место; всем разведчикам известно обогащение свалами вблизи выхода жилы.

Вышесказанное позволяет далее развить понятие об «ореолах». Именно, под «механическим ореолом рассеяния» мы понимаем зону элювия — делювия, обогащенную ценным или характерным для месторождения элементом при состоянии его в твердой фазе, в виде устойчивых, первичных минеральных образований. Кратко отметим, что примерами «ореолов рассеяния» с газовой фазой состояния ценных или характерных элементов будут являться «ореолы» месторождений радиоактивных руд (эманации радия и тория), нефтяных и газовых месторождений (метан и тяжелые углеводороды; гелий) и месторождений серы и угля.

Ниже в схематической форме изложены основные определения, а также соображения относительно генезиса и классификации «ореолов».

1. «Ореолом рассеяния месторождения» мы называем зону элювия — делювия (в некоторых случаях аллювия), обогащенную ценным или характерным для месторождения элементом, вне зависимости от фазы его состояния (твердая, жидкая, газообразная).

В указанный термин вкладываются, во-первых, понятие территориальное и, во-вторых, понятие динамики процесса перехода полезного ископаемого из состояния концентрации в месторождении в рассеянное состояние, в большой массе пустых поверхностных образований.

2. Важнейшими агентами образования и формирования «ореолов рассеяния» являются факторы поверхностного выветривания.

3. Все «ореолы» смогут быть классифицированы прежде всего по фазе состояния в них рассеянного элемента, а затем по генезису, понимая под этим временные отношения образований элювия — делювия — с одной стороны и рассеиваемой фазы — с другой.

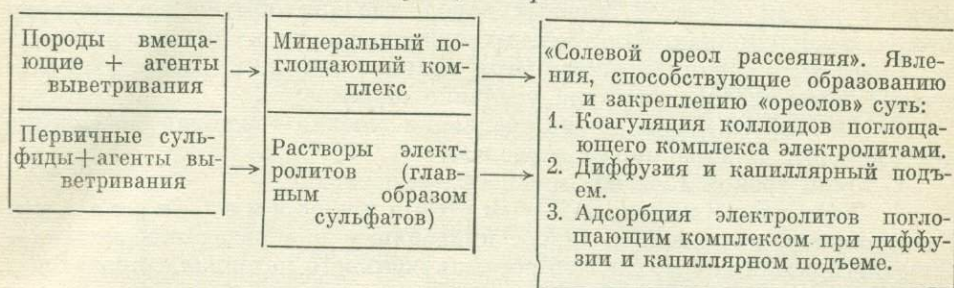
I. Солевые ореолы рассеяния

В указанных ореолах ценный или характерный элемент находится в виде новообразования, обычно в виде растворимой, устойчивой в зоне выветривания соли (например, в виде сульфата).

Законы образования «ореола» — химические и физико-химические.

«Солевые ореолы» характерны для легко изменяющихся в зоне выветривания месторождений (например, для сульфидных, полиметаллических и никелевых месторождений и многих других).

Схема образования типичного «ореола» сульфидного месторождения может быть представлена следующим образом:



С точки зрения генезиса можно различать:

1. Сингенетичные «солевые ореолы». Поглощающий комплекс представлен элювием — делювием, образующимся одновременно с электролитами. В формировании и закреплении «ореола» на первых этапах главное значение имеет коагуляция коллоидов поглощающего комплекса катионами рудных электролитов; в дальнейшем главная роль переходит к диффузии и капиллярному подъему, сопутствующей этому адсорбцией катионов.

С точки зрения поисков эти «ореолы» представляются наиболее доступными.

2. Наложенные «солевые ореолы». Поглощающий комплекс представлен аллювием; растворы позднейшего, чем покров, образования. В формировании и закреплении «ореола» главнейшее значение имеет капиллярный подъем и диффузия, с сопутствующей этому адсорбцией катионов.

С точки зрения поисков эти «ореолы» представляются менее доступными.

II. «Механические ореолы рассеяния»

В указанных «ореолах» ценный или характерный элемент находится в виде первичных минералов, устойчивых в зоне выветривания.

Законы образования «ореолов» — физические и физико-химические.

«Механические ореолы» характерны для месторождений, по минеральному составу представленных устойчивыми в зоне выветривания минералами (например, для месторождений, несущих касситерит, вольфрамит, золото, молибденит и т. п.).

Схема образования типичного «механического ореола» кварц-касситеритового месторождения может быть представлена следующим образом:



Среди условий формирования «механических ореолов» отметим, кроме изложенных:

а) освобождение при выветривании рудных минералов из приконтактных с жилой областей боковых пород, где они обычно присутствуют или во вмещающих, или в мелких жилках, иногда даже непосредственно незаметных, являясь спутниками главной жилы. Освобождающийся ценный материал поступает на усиление «ореола»;

б) боковой снос или общие сползания элювия — делювия по склону, что приводит к деформации «ореола».

С точки зрения генезиса можно различать:

1. Сингенетические «механические ореолы». Выветривание вмещающих пород, приводящее к образованию элювия — делювия и самой жилы, дающей россыпь жильного материала, происходит одновременно. Эти «ореолы» с точки зрения поисков являются наиболее важными.

2. Погребенные «механические ореолы». Покровные породы являются аллювием, издалека принесенным. «Ореол» образовался ранее или образуется под аллювием. С точки зрения поисков использование этих «ореолов» представляется делом наиболее трудным.

III. «Газовые ореолы рассеяния»

В указанных «ореолах» ценный или характерный элемент находится в виде газовой фазы.

Законы образования «ореолов» — химические, химико-физические и физические.

«Газовые ореолы» особым образом характерны для месторождений, несущих газ в качестве полезного ископаемого (гелиевые), в качестве неизбежного спутника (нефтяные) или в качестве продукта радиоактивного распада первичного вещества (радиевые и ториевые месторождения).

Схема образования «газового ореола» может быть представлена, как, главным образом, диффузное распространение газовых продуктов в среде первичных горных пород, откуда они поступают в элювий, или как вынос в водной среде в качестве своеобразных растворов.

С точки зрения генетической «ореолы» газовых и нефтяных месторождений, очевидно, являются наложенными, в то время как «ореолы» радиоактивных месторождений смогут быть и сингенетическими.

В качестве заключения приведем табл. 5, в которой представлены сведения по сравнительному содержанию некоторых металлов и характерных соединений в пустых горных породах (по Кларку и Вашингтону), в рудах (различные сведения) и в рудничных водах, наносах и пр., что может характеризовать содержание в «ореоле рассеяния», хотя и с известной оговоркой, для рудничных вод.

Сводные данные по содержаниям некоторых элементов и соединений в пустых породах, рудах и в «ореолах рассеяния»

Элемент или соединение	Среднее в пустых породах	Среднее в руде	Содержание в «ореоле рассеяния»	Примечание
Zn	0,004%	Не больше 3,0%	Среднее из 15 анализов рудничных вод полиметаллических рудников — 0,01%. В водах района рассеяния цинковых руд Миссури, район Джоплин — до 0,24%	По Эммонсу
Cu	0,01%	От 1,0%	По 13 анализам рудничных вод медных месторождений — до 0,369. То же из 12 полиметаллических — в среднем 0,020	»
Cu	0,010%	От 1,0%	Максимум содержания в глинах и растениях — 0,1%	Н. Н. Сочеванов. Отчет Блявинской партии 1934 г.
H ₂ SO ₄ (свободная)	—	—	Среднее из 7 анализов рудничных вод — 0,029% и до 0,783%.	По Эммонсу
SO ₄ ^{''}	—	—	То же из 18 анализов — 0,182% (иногда значительно больше)	»
Sn	x · 10 ⁻⁶	В коренных, начиная с 1,0%	В среднем 0,3—0,4 и до 0,6—1,0% в типичном «ореоле»	По А. П. Соловову и Н. И. Сафронову
CH ₄	—	—	До 0,15% в почвенном воздухе (до 10 раз выше, чем в свободном воздухе)	По В. А. Соколову (труды НТС по гелию; журнал «Нефтяное хозяйство»)
He	—	—	В 1,5—2 раза выше, чем в свободном воздухе	

Из приведенной таблицы с несомненной ясностью следует, что, действительно, вблизи месторождений наблюдаются образования, несущие в себе повышенные содержания характерного для месторождения элемента. Это является подтверждением того априорного заключения, что в «ореоле рассеяния» мы должны наблюдать целый ряд плавно изменяющихся концентраций того или иного элемента, укладывающийся в большой диапазон, на одном конце которого стоит содержание элемента в теле месторождения, а на другом — содержание его в пустых породах.

4. МЕТОДИКА ПОИСКОВ «ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ»

Очевидно, что поиски месторождения на основе изучения «ореолов» сводятся, по сути дела, к поискам самих «ореолов рассеяния» на исследуемой площади; поэтому мы в дальнейшем будем считать эти операции равнозначными.

Отметим, что уже в настоящее время можно очень многое и детально осветить в отношении методики производства полевых промеров и дальнейшей обработки полученных материалов. Однако размеры статьи не позволяют нам сделать этого в полной мере, принуждая ограничиться изложением в схематическом виде. Остановимся на некоторых основных положениях.

Прежде всего укажем, что в основе всей применяемой методики лежит принцип получения реакций, непосредственно характеризующих исследу-

емый объект с химической стороны. Этот прямой метод применяемых исследований, в противоположность косвенным приемам изучения, практикуемым в широко известных геофизических методах, выгодно отличается рассматриваемую методику и является ее большим плюсом.

Другое положение относится к области терминологии.

Есть все основания полагать, что методы поисков и разведок месторождений, основанные на изучении их «ореолов», следовало бы назвать «физико-химическими методами геологической разведки». Действительно, как мы уже видели, все законы образования «ореолов рассеяния» есть явление физико-химического порядка. В то же время вся методика изучения этих «ореолов» в поисково-разведочных целях есть методика физико-химического эксперимента.

Ниже мы для краткости будем широко пользоваться термином: «физико-химические методы геологоразведки» для суммарного обозначения методики изучения «ореолов».

а. Физико-химические методы поисков «солевых ореолов»

Совокупность указываемых методов получила общее название «ионных методов», поскольку «солевые ореолы» предполагают наличие характерных или ценных элементов состава месторождения в жидкой фазе, а следовательно, в виде ионов.

Среди ионных методов различаются:

Метод избирательных электродов

В основе методики лежит применение таких электродов, потенциал которых избирательно определяется концентрацией известных ионов в электролите.

В настоящее время геофизическим сектором ЦНИГРИ разработана и широко применяется конструкция платинового, свинцово-оксидного электрода, поляризационный потенциал которого избирательно определяется концентрацией в электролите H_2SO_4 (рис. 3), подробнее о теории и графике в статье «Ионный метод геофизических поисков», Е. А. Сергеев и А. П. Соловов.

Методика полевых промеров проста и сводится к измерениям на потенциометре обычного типа потенциала избирательного электрода в паре с каким-либо неполяризуемым электродом при погружении их непосредственно в наносы в точке измерения.

Можно также применять несколько иную методику, а именно, в поле отбирать лишь пробы (определенного веса), а «опробование» на содержание H_2SO_4 производить централизованным образом, где-либо в полевой лаборатории.

Серии промеров необходимо производить в профилях вкост предполагаемого оруденения. Расстояние между точками промеров в профилях 5—10—15 м, расстояния между профилями — в зависимости от размеров рудной залежи.

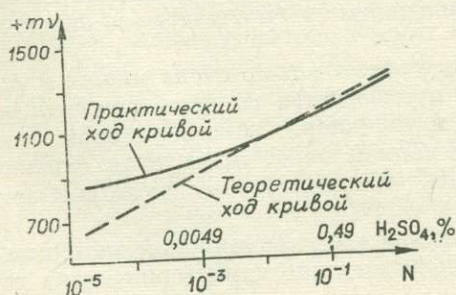


Рис. 3. Зависимость потенциала Pt/PbO₂ электрода в паре с каломелевым полуэлементом от концентрации H₂SO₄.

Рис. 4. Кривая содержания H_2SO_4 в элювии — делювии вкrest полиметаллического месторождения Буурду. Масштаб горизонт. 1 : 4000. 1 — рудная зона; 2 — аляскит-граниты; 3 — гранито-гнейсы; 4 — кварцевые порфиры. Мощность наносов ~ 1,0 м и выше.

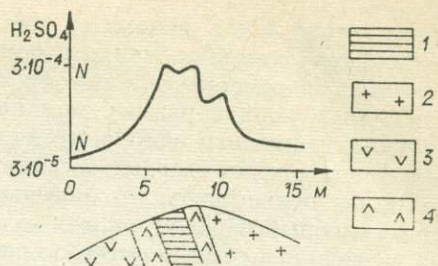


Рис. 4 изображает результаты исследования с избирательным электродом по профилю вкrest месторождения Буурду, полученные Северо-Киргизской партией ЦНИГРИ в 1935 г. (начальник партии И. С. Сидоров).

Указанный пример не является единственным; целый ряд аналогичных работ имел место и до 1935 г.

Электролитический метод

Идея электролиза природных растворов непосредственно в наносах, как среде, куда помещались бы электроды, возникла и была проверена А. П. Соловьевым и Н. И. Сафроновым на одном из месторождений Рудного Алтая в 1932 г. Однако эта попытка, несмотря на ряд благоприятных, казалось бы, обстоятельств, как то: возможность погружения электродов (по крайней мере катода) в затопленную выработку на известном рудном теле, возможность продолжительного времени эксперимента (до двух недель) и т. д., окончилась неудачей. Видимых количеств металлов (в частности, меди), что можно было ожидать исходя из общих представлений о металлогении района и, следовательно, о составе подземных вод вблизи месторождений, обнаружено на катоде не было.

Указанная попытка заставила серьезно заняться рассматриваемой проблемой, которая и получила известное завершение благодаря работам физико-химической лаборатории геофизического сектора ЦНИГРИ в 1935 г. (С. Д. Миллер, Е. А. Сергеев).

В результате исследований, проведенных в этой лаборатории над комплексными растворами, отвечающими средним содержаниям рудничных вод, было установлено следующее.

1. Электролиз металлоносных растворов в диффузной среде, не обладающей заметными адсорбционными свойствами (например, в кварцевом песке), удается лишь в случае создания искусственной кислотной обстановки в зоне катодного пространства. В обычных условиях электролиз металлов не наблюдается, на катоде выделяется водород, а в среде происходит осаждение металлов из растворов их солей в виде гидратов, в силу реакции с ионом гидроксила (ОН).

2. Электролиз, по обычной схеме, металлоносных растворов в среде, обладающей заметной адсорбцией катионов тяжелых металлов (например, в глинах), не происходит вовсе, хотя и наблюдается благодаря электроэндоосмосу значительное обогащение катодного пространства жидкой фазой.

Эти обстоятельства заставили прибегнуть к помощи электродиализа. Этим проблема быстрого и легкого отбора проб металлоносных растворов была разрешена в лучшем виде.

На рис. 5 приведена схема электродиализа. В принципе идея сводится к тому, что освобождающи-

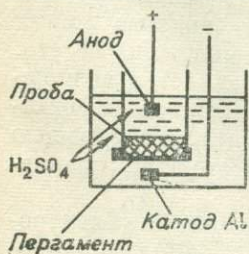


Рис. 5. Схема электродиализа проб наносных образований.

еся на аноде ионы водорода, проходя под действием поля к катоду, освобождают адсорбированные ионы тяжелых металлов, замещая их. Последние, перемещаясь к катоду, или высаживаются на нем (в случае достаточных концентраций), или просто обогащают катодит.

Избыток кислоты одновременно благоприятно сказывается на растворимости возможных твердых соединений тяжелых металлов.

Опыты показывают, что обычная проба весом 300—400 г обрабатывается подобным образом, вплоть до полной потери адсорбированных катионов, в течение весьма короткого времени (в пределах до 1 ч в зависимости от толщины слоя пробы и применяемой силы тока).

Что касается качественного и количественного анализа самого таким образом полученного катодита, то он может быть произведен различными путями (микрхимия, капельный анализ, спектральный анализ, полярографический анализ).

Исходя из работ физико-химической лаборатории геофизического сектора ЦНИГРИ, где в 1935 г. производились опытные исследования по применению полярографического анализа к определению состава природных электролитов и где уже изготовлена полевая модель полярографа типа Гейровского — Шиката, есть все основания полагать, что именно упомянутый метод явится весьма действенным, точным и легко осуществимым в полевой обстановке, методом быстрого анализа комплексных электролитов.

Достаточно подробное изложение идеи самого метода полярографического анализа, необходимой аппаратуры и производства анализов на русском языке имеется в статье Е. Н. Варасовой («Современные физико-химические методы химического анализа», сборник статей под редакцией проф. С. А. Щукарева, вып. II).

Поэтому мы ограничимся лишь приведением основной идеи. Идея полярографического анализа зиждется на том основном наблюдении, что нарастание силы тока в цепи, включающей в себя какой-либо электролит, для известного диапазона напряжений (от 0,0 до 2,0—4,0 V) и при ничтожном сопротивлении электролита, происходит скачками, момент наступления и амплитуда которых определяются составом электролита и концентрациями в нем составных частей.

Указанное явление обуславливается тем, что выделение того или иного катиона на электроде (с началом этого явления стоит возникновение или нарастание тока в цепи) осуществляется лишь при достижении определенных потенциалов, так называемых потенциалов выделения катиона, которые различны для различных катионов.

В полярографе осуществлена возможность фотозаписи кривой нарастания тока при плавном изменении подаваемого на электроды напряжения. Особая конструкция электродов (ртутный капельный катод и большой по площади ртутный анод) позволяет избежать мешающих поляризационных электродных явлений, а также обеспечивает постоянство состава электролита.

На рис. 6 представлена схема типичной полярограммы, получаемой на полярографе. Здесь отметки напряжения V_n определяют собой род начинающего выделяться катиона, а амплитуды скачков тока J_n характеризуют в известной степени концентрацию этого катиона в анализируемом электролите. Время производства полярографического анализа может быть сведено к нескольким минутам, при полной комплексности его.

Таким образом, с помощью электролиза представляется возможным явным образом перевести адсорбированные катионы тяжелых металлов из обрабатываемой пробы в жидкую фазу — в катодит, а с помощью полярографа произвести качественный и, в известной степени, количественный анализ этого катодита.

Методика полевой работы при поисках «солевых ореолов» по электролитическому методу сводится к отбору небольших (до 300—400 г) проб на-

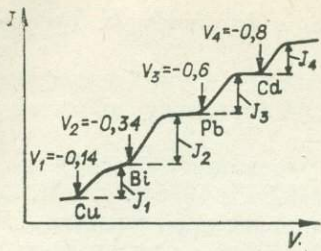


Рис. 6. Схема полярограммы при анализе комплексных электролитов.

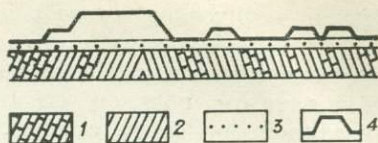


Рис. 7. Кривая содержания бора в элювии — делювии по профилю вкрест месторождения № 7 (Индерский район). Масштаб горизонт. 1 : 10 000, масштаб вертикал. 1 : 1000. 1 — гипсы; 2 — боратоносные глины; 3 — элювий-делювий; 4 — кривая содержания бора в элювии-делювии, в усл. ед.-баллах (1 балл = 0,5 см).

носов по частой сетке (порядка 5—10—15 м друг от друга в профилях) в пределах исследуемой площади. Расстояние между профилями должно всецело определяться размерами искоемых рудных тел, будучи подчинено общеизвестным практическим нормам.

В дальнейшем пробы должны быть подвергнуты электродиализу, а полученный таким образом катодит — полярографическому анализу. В случае нужды допустимо (а в ряде случаев необходимо) предварительное сокращение и измельчение проб.

Данные полученных анализов могут быть изображены либо в виде профилей, либо в виде изолиний содержания тех или иных металлов в наносах на исследуемой площади. Максимумы концентраций, очевидно, оконтурят «ореол рессеяния».

Производительность съемки, по-видимому, определяется 40—50 пробами в день на прибор при одном рабочем на их отбор и подготовку.

Указанная методика намерена к широкому применению в ближайшее время на различных месторождениях руд цветных металлов, дающих «солевые ореолы» (медь, цинк, никель и др.).

В качестве практического материала по применению ионной методики приведем пример борометрической съемки, имевшей место в 1935 г. на Индерских месторождениях боратов (Индерская геофизическая партия ЦНИГРИ, начальник А. Г. Линьков).

На рис. 7 приведены результаты работ по одному из профилей вкрест месторождения № 7.

На приведенной фигуре ясно видно сопровождение боратоносных пластов повышенными концентрациями бора в элювии—делювии при практическом отсутствии его вдали от месторождений. Пробы брались с глубины 20—50 см. После выщелачивания дистиллированной водой выщелоченный субстрат подвергался анализу на содержание иона бора, пользуясь реакцией с хинализарином (см. Файгль, «Капельный анализ»). Количественное содержание бора изображалось в условных единицах — баллах.

Без сомнения, этот метод поисков бора сможет быть весьма действенным в различных условиях. Следует только иметь в виду, что фаза состояния бора в самой пробе будет безусловно различной (в зависимости от внешних условий).

Для сухих, засушливых районов Казахстана (Индер) бор, по-видимому, находится в «ореоле» в твердой минеральной фазе. В условиях достаточной влажности подавляющее количество бора в «ореоле» должно находиться в жидкой фазе, в виде растворенных солей. В зависимости от этих обстоятельств стоит и выбор способа обработки проб элювия—делювия для анализа и самый метод анализа (капельнохимический анализ, спектрометрия и т. д.).



б. Физико-химические методы поисков «механических ореолов»

В настоящее время наиболее перспективным и уже зарекомендовавшим себя методом поисков «механических ореолов» является метод спектрометаллометрической съемки.

Сущность полевой методики работ по указанному способу, по опыту Хапчерангинской геофизической партии ЦНИГРИ 1935 г. (А. П. Соловов и Н. И. Сафронов) сводится к взятию небольших проб элювия—делювия (300—400 г) по частой сетке с глубины 20—40 см от поверхности (ниже почвенного слоя). Линии взятия проб располагаются вкрест ожидаемого простирания рудных тел; точки взятия проб друг от друга — 5—15 м; расстояния между профилями — в соответствии с размерами рудных залежей.

При взятии проб необходимо стремиться к получению наиболее мелкой глинисто-песчанистой фракции, избегая значительных (2,0—3,0 см в поперечнике) кусков.

Взятые пробы необходимо предварительно измельчить до крупности зерна 0,5—1,0 мм и в этом состоянии сквартовать до веса 15—20 г. В этом объеме пробы истираются в фарфоровой или агатовой ступке до крупности порядка 200 меш и тогда уже поступают на анализ.

Как показал опыт той же Хапчерангинской партии, определение содержания в пробе искоемых компонентов, в частности олова, вполне можно производить спектральным путем, на приборах с кварцевой оптикой. В качестве источника света и высокой температуры может служить как вольтова дуга, так и конденсированная искра. В случае пользования дугой измельченная сухая проба весом несколько миллиграмм помещается в отверстие угольного электрода (анода) и спектр пламени фотографируется. Количественное содержание олова в пробах определяется визуальным путем на фотоспектрограммах, по методу «появления линий» в сочетании с методом сравнения со спектрограммами эталонов, где содержание олова установлено предварительно прецизионным химическим путем.

В настоящее время уже имеется ряд заметок и статей, посвященных достаточно детальному рассмотрению вопросов спектроанализа касситеритосодержащих проб в полевых условиях (см. «Разведка недр» № 6, 14, 24 за 1935 г., заметки Сафронова и Соловова, а также статью Проккофьева, Соловова и Сафронова «Применение спектроанализа в полевой разведке на олово», напечатанную в трудах НИТО), а также трактующих вопросы спектроанализа вообще (например, статья Боровика и Филлипова в сборнике «Современные физико-химические методы химического анализа» под редакцией проф. С. А. Щукарева, вып. I).

Поэтому мы не будем далее касаться данного вопроса, отметив лишь, что точность количественных определений олова в касситеритосодержащих пробах вполне удовлетворяет запросы практики поисков и разведки оловорудных месторождений методом спектро-станнометрической съемки (во всем интервале содержания олова в пробах от тысячных долей и до 1,0% средняя точность каждого определения может быть легко доведена до $\pm 10\%$ от определяемой величины).

В качестве конкретного примера уже проведенных работ приведем рис. 8. На ней изображена кривая содержания олова в элювии — делювии в «ореоле рассеяния» одной из известных оловорудных жил.

Из приведенного рисунка следует, что ширина зоны «ореола» с явно повышенными содержаниями олова достигает 30 м, что вполне допускает ведение работ по сетке 5—10 м.

Интересно отметить, что, помимо спектроанализа, вряд ли другой какой-либо способ анализа мог быть действенным при столь малых весах проб. Химический анализ, правда, смог бы быть примененным, однако он недопустимо медлителен и дорог. Что касается анализа под бинокулярной лупой, то он, по-видимому, весьма ограничен в своих возможностях.

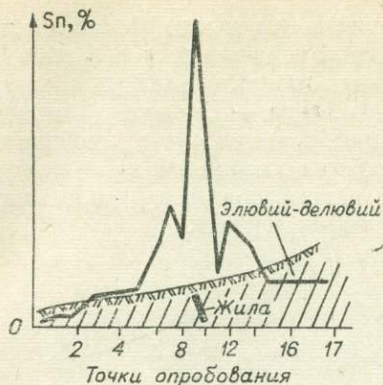


Рис. 8. Кривая содержания олова в элювии — делювии в «ореоле рассеяния» вкрест одной из оловорудных жил. Масштаб горизонт. 1 : 2000, масштаб вертикал. 1 : 1000.

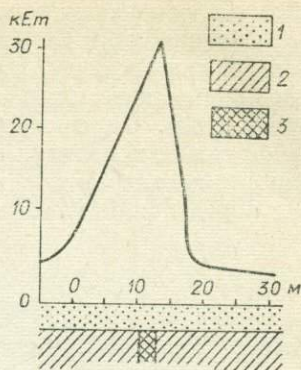


Рис. 9. Пример радионовой съемки на пегматитовой жиле (Лейвойва, Кольский полуостров), масштаб 1 : 500.
1 — морена; 2 — кристаллические сланцы; 3 — пегматит.

Очевидно, что в «ореоле» касситерит находится не только в виде изолированных, отдельных зерен, но и в распыленном (быть может в коллоидальном) состоянии в виде мелкой вкрапленности в кусочках боковых пород из зоны непосредственного контакта с жильным телом. Совокупность всех этих состояний касситерита, очевидно, и является характерной для «ореолов», обуславливая тем самым повышенные содержания олова в этой зоне оловорудных месторождений. Не подлежит никакому сомнению, что метод, в точности подобный спектро-станнометрической съемке, может быть с одинаковым успехом применен и на вольфрамовых, и на молибденовых, и еще на целом ряде месторождений руд, минеральный комплекс которых является устойчивым в зоне выветривания (хром, бериллий, сурьма, висмут и т. п.).

в. Физико-химические методы поисков «газовых ореолов»

Эти методы получили уже свою достаточно завершенную методику в многочисленных работах проф. В. А. Соколова, автора составления газовых съемок для поисков нефтяных и газовых месторождений и геофизического сектора ЦНИГРИ (радоновые и тороновые съемки на месторождениях, несущих радиоактивные минералы).

Подробное описание газовых съемок дано в статьях В. А. Соколова («Нефтяное хозяйство» и другие журналы за 1934 г.), а радиометрических съемок — в «Курсе радиоактивных методов геофизической разведки» (коллектив авторов: А. П. Кириков, П. Н. Тверской, А. Г. Граммаков и др.).

Поэтому мы не будем вовсе останавливаться на этих методиках, отметив, что объектом исследования является содержание метана и тяжелых углеводородов в почвенном воздухе при газовых съемках и радиовой и ториевой эманаций также в почвенном воздухе при радоновых и тороновых съемках в радиометрии.

Пробы воздуха отбираются по некоторой сетке с глубины порядка 1—2 м, анализ производится химическим путем при газовой съемке и электрометрическим путем в радиометрии.

В качестве примера приведем рис. 9, иллюстрирующий применение радоновой съемки на месторождении пегматитов в Лейвойве (Кольский полуостров), произведенной геофизической партией ЦНИГРИ в 1934 г. (Б. С. Айдаркин).

Есть все основания рекомендовать применение газовой съемки с про-
мерами концентраций CO_2 на угольных месторождениях и SO_2 или H_2S
на месторождениях серы. Примеры обильных газоотделений упомянутого
состава широко известны (уголь — Донбасс, сера — Сицилия, Волжские
месторождения). Определение концентраций рекомендуется производить
по частой сетке, используя методы поглощения указанных газов соответ-
ствующими растворами, с последующим использованием для количест-
венных определений известных приемов нефелометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше с полнотой, допускаемой размерами статьи, были рассмотрены
как теоретические обоснования «ореолов рассеяния» месторождений,
так и методы поисков их как средство геологического изучения.

Поэтому здесь мы очень кратко сделаем лишь основные выводы и на-
метим те задачи, которые еще стоят в затронутой области.

Выводы, которые могут быть сделаны, сводятся к нижеследующему.

1. Существование «ореолов рассеяния» месторождений, с несомнен-
ностью следующее из общетеоретических представлений, с достаточной
убедительностью доказано на опыте соответствующих работ, проведенных
со специальными целями на различных месторождениях (полиметалличе-
ские, оловорудные месторождения, месторождения бора и т. д.).

2. Тип «ореола», рассматривая этот вопрос с точки зрения состояния
в нем характерного или ценного для месторождения элемента, может быть
«солевым», «механическим» или «газовым» в чистом виде или смешанным,
если одновременно в «ореоле» присутствуют все фазы.

Подобное понимание «ореолов» охватывает месторождения всех воз-
можных типов полезных ископаемых. При этом тип «ореола» будет все-
цело определяться склонностью жильного материала давать те или иные
продукты вторичных изменений.

3. Разработанная в последнее время в геофизическом секторе
ЦНИГРИ полевая методика поисков «ореолов» важнейших типов («соле-
вых», «механических») может считаться оправданной рядом практических
примеров (Северная Киргизия, Хапчеранга, Индер) и на основе этого
может быть рекомендована к широкому применению.

В частности, для «механических» ореолов настоятельно рекоменду-
ются спектрометаллометрические съемки, а для «солевых» — избира-
тельные электроды и полярографический анализ, в сочетании с электро-
диалитической обработкой проб, или методы капельного балльного
анализа.

В отношении поисков «газовых» ореолов уже имеется методика га-
зовых съемок на гелиевых и нефтяных месторождениях, предложенная
проф. В. А. Соколовым. Заметим, что здесь настоятельно требуется раз-
работка методов экспресс-анализов. В отношении эманационных съемок
на месторождениях радиоактивных руд дело обстоит вполне ясно, и здесь
накоплен богатый опыт.

Экономическая сторона вопроса не должна являться препятствием.
В частности, для спектро-станнометрических съемок стоимость обследо-
вания 1 км^2 вряд ли будет дороже 3 тыс. рублей при густоте сети
1000 проб, что в большинстве случаев вполне удовлетворит даже повы-
шенные требования к детальности работ.

Таким образом, имеются достаточные основания к повсеместному
использованию рекомендуемых методик, тем более, что в своей основе они
не потребуют организации самостоятельных партий, а смогут быть при-
меняемые силами обычных поисково-геологических отрядов, конечно
при условии обеспечения их технической базой (спектрографы, поляро-
графы).

Наряду с этим уже сейчас может быть намечен ряд первоочередных задач, решение которых должно быть достигнуто в ближайшее время.

Во-первых, задачи теоретического порядка, относящиеся к разрешению некоторых вопросов формирования и закрепления «ореолов». В частности, весьма важным представляется точное выяснение роли коллоидов.

Во-вторых, задачи методического порядка.

Здесь это, прежде всего, опытное применение спектрометаллометрических съемок на вольфрамовых, молибденовых и золотых месторождениях.

Опыты в направлении разработки методики спектроанализа на первые два металла, проводимые в ГОИ и геофизическом секторе ЦНИГРИ, в настоящее время уже близки к положительному разрешению. Есть основания полагать, что на золото методика также может быть легко выработана.

Затем не менее важным является применение полярографического (и спектрального) анализа при поисках никелевых месторождений, спектроанализа на берилл, сурьму и т. д. В этом отношении уже есть некоторые положительные результаты (успешное применение спектроанализа к бериллию и сурьме на Хапчеранге в 1935 г.).

Далее важно попытаться применить газовые съемки на угольных месторождениях (углекислота в «ореоле») и на сере (SO_2 или H_2S). В этом направлении технические препятствия вряд ли встретятся.

Наконец, чрезвычайно актуальной задачей, в которую по сути дела упирается практика полевого эксперимента, является широкое обеспечение спектрографами и полярографами наших геологоразведочных организаций. Предпосылки к этому имеются хотя бы в виде спектрографов с сильвиновой оптикой, освоенных производством в ГОИ.

Разработка соответствующих методик при использовании приборов со стеклянной оптикой, к чему имеются все предпосылки в виде ряда работ Московского государственного университета, могла бы явиться выходом из положения, так как спектрографы подобного типа легко осуществимы (стиллометры). Работы в этом направлении уже начаты в ЦНИГРИ. Успешное завершение их значительно облегчит использование в целях спектрометаллометрических съемок растительного покрова, к чему имеются как научно-практические основания, так и небольшой опыт применения (Н. Н. Сочеванов, 1934 г.).

Наконец, в виде большой проблемы, еще ждущей даже самых начальных опытов для своего разрешения, стоит задача применения физико-химических методов к геологическому картированию путем сравнительного изучения элювия—делювия в свете представлений, изложенных в настоящей заметке.

При разрешении этих задач для методики поисков и разведки, а также геологического картирования, основанных на изучении «ореолов», откроется широкое поле деятельности во всех областях изучения недр.

ЦНИГРИ, г. Ленинград

Н. И. САФРОНОВ

К ВОПРОСУ О ЗАКОНОМЕРНОСТИ СООТНОШЕНИЙ «ЗАПАСЫ — СОДЕРЖАНИЯ» В РУДАХ

ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XIX—XX столетий Ф. Кларком и В. И. Вернадским было сделано и утверждено в науке открытие всеобщего повсеместного рассеяния химических элементов во всех геологических объектах. С тех пор это

открытие находится в основании современной геохимии — науки о химическом составе и строении земного шара, его естественных оболочек, горных пород и т. п.

В 30-е годы началась разработка физико-химических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, в своей теоретической части покоящихся, по существу, на геохимической основе. Можно сказать, что эти методы являются прикладной геохимией в том же смысле, в котором геофизические методы поисков и разведки являются порождением физики Земли.

Дальнейшее развитие прикладных геохимических методов, равно как и геохимия в целом, повело к проникновению геохимии в область учения о рудных месторождениях; таковым, в частности, может служить пример вмешательства геохимии в вопрос о взаимосвязях запасов руд с содержаниями в них полезных компонентов. Существо и практические результаты этого и являются предметом рассмотрения в настоящей статье.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СВЯЗЯХ ЗАПАСОВ С СОДЕРЖАНИЯМИ В РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

В современной науке о рудных месторождениях и в ее практических ответвлениях — разведочном деле и подсчете запасов — бытует представление о случайном (вероятностном) характере связей, существующих между запасами и содержаниями в них полезных компонентов. Раз это так, то в основу теоретических представлений об этих связях, совершенно резонно, кладется теория вероятностей со всеми вытекающими отсюда последствиями, как то: принятием среднего из ряда содержаний в качестве вероятнейшего значения этого параметра; проведением опробования по частой, равномерной сети; применением коэффициента вариации в качестве одного из ведущих показателей; своеобразным использованием данных «ураганных» проб; употреблением метода корреляции и т. п.

В то же время у нас в стране к настоящему моменту накопился целый ряд месторождений различных металлов, которые были обнаружены, разведаны и практически выработаны за советское время. Таким образом, представилась возможность сопоставления различных, интересных для выводов цифр, полученных в практически однообразных условиях их осуществления. Так, в одном из описанных случаев сопоставлены были цифры запасов металла, полученные предварительным подсчетом по данным опробования разведочных блоков, с одной стороны, и с другой — по данным эксплуатации этих же блоков. Были установлены расхождения от -94% до $+326\%$. Следует подчеркнуть, что эти цифры получены при разведке подземными горными выработками, и они становятся неизмеримо худшими при переходе на разведку бурением.

Конечно, погрешности снижаются при объединении блоков (по существу, при увеличении числа использованных при расчете проб), все же остаются высокими (десятки процентов) при числе блоков в подсчетной группе 5—15 шт. Подобная описанной картина наблюдается на многих месторождениях различных металлов как у нас в Советском Союзе, так и за рубежом.

В связи с этим возникает один основной вопрос — а в какой мере правомочен вероятностный подход при оценке запасов и нет ли здесь, в области взаимоотношений «запасы — содержания», каких-либо количественных закономерных взаимосвязей? К подобному выводу приводит и такое соображение. Именно возникновение любых рудных месторождений в земной коре, в данном месте и на фоне и за счет всеобщего геохимического рассеяния элементов, нельзя себе представить без разделения и перемещения земного вещества. В то же самое время эти процессы по существу своему суть процессы химико-энергетические, т. е. немислимые

без вмешательства соответствующей энергии. Иными словами, эти процессы принадлежат к области термодинамики химических процессов, и для подавляющего числа случаев описываются вполне однозначными уравнениями. Таким образом и возникают определенные предпосылки к тому, чтобы предположить о наличии закономерностей в области «запасы — содержания» и попытаться вскрыть эти закономерности.

ОСНОВНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАССМОТРЕНИЯ

Неоднократно и различными лицами проделывался анализ проявления рудообразующих элементов в земной коре, количественных взаимоотношений различных проявлений и генетических зависимостей между ними. Этот анализ дает возможность сделать следующие выводы.

В земной коре с несомненностью установлены два вида проявлений рудообразующих элементов — рассеянное и концентрированное.

Рассеянное проявление рудообразующих элементов, с единообразно низкими содержаниями, охватывает собою все геологические образования земной коры, да и не только земной коры. Рассеяние неоспоримо существует в мантии (по крайней мере в верхней), в ядре (установлено по анализам метеоритов), во всех верхних оболочках Земли, во всех космических образованиях, представляя собою универсальное явление.

Существующие геохимические таблицы кларков элементов иллюстрируют наблюдающиеся содержания. Возникновение всеобщего рассеяния элементов в Земле относится к космическому этапу ее развития; ему свойственно преимущественно безминеральное существование элементов в породах и в других образованиях.

Концентрированное нахождение рудообразующих элементов в Земле, в форме рудных месторождений с содержаниями, подчас превосходящими таковые в рассеянии в десятки — сотни тысяч раз, наблюдаются в земной коре спорадически, всегда на фоне первичного рассеяния элементов. Характерной особенностью месторождений является практически универсальный минеральный вид существования элементов. Возникновение природных концентраций не раньше консолидации земной коры и, бесспорно, позже образования всеобщего рассеяния в Земле.

Количественные соотношения масс рудообразующих элементов, сконцентрированных в рудных месторождениях и находящихся в рассеянном состоянии в земной коре, по подсчетам различных лиц, крайне невелики и выражаются цифрами (%) 0,02—0,03, до 0,05.

Вся совокупность накопленных геолого-геохимических материалов, а именно: отсутствие каких-либо данных о наличии в недрах Земли специфических резервуаров изначальных «рудных магм», и, добавим, теоретическая невозможность их существования после неоднократных переплавлений, которым подвергалась Земля; непосредственные полевые многосторонние материалы, свидетельствующие о наличии бесспорных прямых генетических связей между определенными типами изверженных горных пород и специфическими группами рудных месторождений; временные взаимоотношения между рассеянием и концентрациями, свидетельствующие, что первичное рассеяние образовалось ранее, чем концентрации, — с несомненностью свидетельствует, что природные концентрации рудообразующих элементов, иначе рудные месторождения, возникают внутри и за счет ранее образовавшегося рассеяния тех же элементов.

Простое сравнение запасов рудообразующих элементов, находящихся в рассеянном состоянии в горных породах коры, с одной стороны, и в состоянии концентрации в рудных месторождениях — с другой, показывает, что рассеяние, в свете круговорота веществ в природе, представляет собою действительно неисчерпаемый резервуар для образования природных концентраций — рудных месторождений.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ

Исходя из представления о том, что образование рудных месторождений происходит вторичным путем, внутри и за счет ранее возникшего рассеяния, необходимо установить термодинамические условия, при которых подобный процесс вообще возможен в природе. В этих целях обратим внимание на следующее.

Вся Земля, и во всяком случае ее кора, представляет собою сложную физико-химическую систему, в которой тем не менее возможно выделить «растворитель» — 8-элементный (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg) минеральный комплекс и в нем «растворенное» вещество — а также остальные 84 элемента (в том числе рудообразующие), находящиеся в безминеральном виде.

Рассеянное состояние рудообразующих элементов, возникшее, как отмечалось, в Земле еще в космическую эпоху ее развития и неоднократно укреплявшееся в периоды частичных или полных переплавлений ее, несомненно имело время для достижения равновесия, по крайней мере в массах однофазных пород. Об этом свидетельствуют практически единообразные значения кларков элементов в одинаковых породах разных районов в целом, однако характеризующиеся цифрами одного порядка малости.

Согласно второму началу термодинамики — одному из трех основных законов рассматриваемой науки — выравнивание интенсивных параметров (давления, температуры, концентрации, электрического потенциала и др.) в объеме всей системы происходит самопроизвольно, под влиянием внутренней энергии системы. Примерами могут служить многочисленные случаи смешения воды и спирта, различно нагретых предметов, различных газов. Наоборот, самопроизвольное разделение смесей на свои исходные ингредиенты есть процесс невозможный, о чем говорит весь наш обиходный опыт, в частности, сохранность без разделения на спирт и воду в течение тысячелетий греческих и римских вин в амфорах из затонувших судов, пролежавших под водой до нашего времени.

Смеси могут быть разделены на ингредиенты при одном условии — при вмешательстве внешней по отношению к смеси энергии и в тех больших удельных количествах, чем беднее смеси.

Как отмечалось, земная кора — геохимическая смесь, следовательно, самопроизвольная концентрация в ней рудообразующих элементов, даже в благоприятных принципиально для этого расплавленных состояниях, с образованием рудных месторождений невозможна. Для этого необходимо вмешательство внешней энергии.

Природную энергию, в результате вмешательства которой внутри и за счет всеобщего рассеяния рудообразующих элементов возникают их естественные концентрации — рудные месторождения, мы будем называть энергией рудообразования. Показательным примером существования подобной энергии является анализ работы любой обогатительной фабрики. Не требуется никаких доказательств тому, что изготовление однородного концентрата из руд разных содержаний потребует на фабрике различных затрат энергии — меньших, если руды богатые, и больших, если руды бедные.

Если мы не хотим впасть в конфликт с законом сохранения энергии, то будем вынуждены признать, что это потому так, что энергетические издержки, сопровождающие доработку бедных руд до состояния богатых, уже восполнены природой.

Физико-математический аппарат современной термодинамики, при определенном роде допустимых предположениях, вполне позволяет проинформировать все необходимые энергетические расчеты, с выходом до числа.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Прежде чем приступить к соответствующим термодинамическим расчетам, сформулируем физико-химические условия, для которых они должны быть произведены.

В качестве исследуемого класса месторождений выбираются постмагматические, гидротермальные, различных металлов. Этот класс, по решающему участию воды в его образовании, в известном смысле показателен, поскольку вода как фактор рудообразования той или иной значимости принимает участие в формировании как всех постмагматических, так и других классов рудных месторождений. Помимо этого, постмагматические месторождения в целом, подразделением которых являются выбранные, в своем зачаточном состоянии так или иначе несомненно связаны с магматическими расплавами. Кроме того, гидротермальные месторождения имеют первостепенное практическое значение для большинства металлов.

Источником рудообразующих элементов и потребляемой рудообразующей энергии служит родоначальная, вероятнее всего, гранитоидная магма.

Началом формирования рудообразующего гидротермального раствора-расплава является начало остывания родоначальной кристаллизации, образуется, с одной стороны, все возрастающая масса гранитоидной интрузивной породы и, с другой — внутренний гидротермальный очаг. При этом процессе происходит естественное разделение веществ интрузивной магмы — все, повышающее температуру затвердевания, отходит в твердую фазу, все понижающее — в жидкую, в гидротермальный раствор-расплав. На последних стадиях кристаллизации первоначальный ионизированный раствор-расплав преобразуется в своеобразное новообразование, основу чего составляют стереохимические, преимущественно хелатные, комплексные и сверхкомплексные, насыщенные металлами соединения. По литературным данным, кристаллизация гранитоидов, а следовательно, и образование рудообразующей гидротермы происходит универсально при 800—600°C или при средней постоянной температуре 700°C (~1000 K). Поскольку при рассматриваемом процессе происходит, во-первых, разделение исходного магматического вещества на две фазы (твердую и жидкую); во-вторых, самый раствор-расплав преобразуется из диссоциированного ионного в ассоциированный комплексный, практически нейтральный; в-третьих, состав минеральной нагрузки гидротермы становится резко иным, чем состав исходной магмы (увеличивается содержание рудообразующих и уменьшается содержание порообразующих элементов), поскольку на все эти операции потребны затраты энергии, ибо только прямо противоположные процессы протекают самопроизвольно.

Возникший таким образом рудообразующий гидротермальный раствор-расплав покидает внутриинтрузивный очаг, вернее всего под влиянием внутреннего давления. При этом раствор-расплав образует практически вертикальный выводной канал, в результате универсальной особенности массивов горных пород легче поддаваться горизонтально направленным разрывным усилиям.

Подъем вверх по каналу совершается до уровня, при котором достигаются термодинамические условия разрушения нейтральных комплексных образований, когда они преобразуются в обычные водные насыщенные ионные растворы, способствующие возникновению реакций. В результате этого из преобразованного рудообразующего раствора выпадают рудные и жильные минералы, создающие руды, вода отфильтровывается в боковые породы, вокруг рудных тел возникают ореолы первичного рассеяния месторождений.

Из всего изложенного вытекает, что потребление энергии собственно рудообразования происходит на этапе кристаллизации магмы, когда возникают породный массив и внутри него — рудообразующий раствор. На других этапах становления массива и месторождения происходят процессы рассеяния ранее запасенной энергии, в том числе и при возникновении ореола первичного рассеяния месторождения.

ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГИИ РУДООБРАЗОВАНИЯ

Установив задачи и общие условия их решения по потреблению энергии рудообразования, сформулируем принципы и принятые условия расчета этих задач. Для этого прежде всего обратим внимание на то, что разделение веществ происходит внутри среды — магмы, химически до разделения находящейся в состоянии равновесия. Согласно законам термодинамики подобные равновесные системы обладают максимумом энтропии. Далее, в конечном итоге, в результате разделения на месте единицы объема исходной равновесной гранитоидной магмы в гидротермальном очаге естественным путем возникает новообразование — рудообразующий материал того же объема, химический состав минеральной нагрузки которого совсем не тот, что у родоначальной магмы — при этом процесс протекает практически при постоянной температуре. Наконец, ввиду высокой температуры процесса (~ 1000 К), значительно превосходящей критическую температуру воды (~ 747 К), большого давления (тысячи атмосфер), практической нейтральности образующихся при реакциях веществ процесс формирования рудообразующего раствора может рассматриваться по идее близким к изотермическим идеальным процессам. При этих условиях можно наблюдать следующее.

Фактором, определяющим затраты энергии, является изменение, точнее, уменьшение энтропии против максимальных значений ее, свойственных равновесному состоянию до разделения. Расчеты затрат энергии должны быть произведены в отношении всех элементов, участвующих в процессе, с учетом изменений их содержаний в единице объема до и после разделения.

Расчетной формулой расхода энергии до образования объема минеральной нагрузки гидротермального раствора-расплава на месте единицы объема исходной магмы в соответствии с законами термодинамики изотермических идеальных процессов является

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{i=n} M_i T R \ln K_i, \quad (1)$$

где M_i — количество i -го элемента, вовлеченного в процесс рудообразования, в молях; T — абсолютная температура процесса, равная по условиям 1000 К; R — универсальная газовая постоянная; K_i — степень увеличения (или уменьшения) содержания i -го элемента в гидротерме, по сравнению с содержанием его же в исходной магме (рассчитывается на одну и ту же единицу объема); n — число элементов, вовлеченных в процесс.

Общий расход энергии рудообразования в расчете на единицу объема руды, при n элементах, вовлеченных в процесс рудообразования, после упрощающего приравнивания порознь единице постоянных величин в формуле (1) (например, R , T и др.) может быть рассчитан по формуле

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{i=n} K_i \ln K_i. \quad (2)$$

Как показывает анализ результатов использования формулы (2) при практических расчетах, подавляющая часть энергии во всем интервале практически интересных содержаний главного рудного металла приходится на концентрирование в руде именно его. Значительно меньшая часть энергии расходуется на концентрацию — деконцентрацию второстепенных «жильных» элементов. Это дает право на упрощающее преобразование формулы (2), которая после этого приобретает вид:

$$\varepsilon = K_{\text{эф}} \cdot \ln K_{\text{эф}} = \alpha K_{\text{м}} \cdot \ln \alpha K_{\text{м}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{м}}$ — кларк концентрации главного рудного компонента — металла в руде, по отношению к родоначальной гранитоидной магме; α — коэффициент пропорциональности, разный для разных металлов ($1 \leq \alpha \leq 1,15$), учитывающий расход энергии на концентрацию — деконцентрацию в единице объема руды «жильных» элементов.

Величина α меняется:

Металл	Золото	Олово	Медь	Полиметаллы	Магнетитовое железо
Значение α	1,11	1,0	1,13	1,08	1,12

Формула (3) в индивидуальном порядке может быть использована для целей отображения в единых универсальных энергетических показателях данных сложных анализов многокомпонентных геологических объектов — многометалльных руд, комплексных ореолов и др. Для целей прогнозирования запасов этой одной формулы недостаточно.

Для возможности определения запасов необходимо знать количества энергии, «выделяемые» природой на образование руд данных кондиций. В этих целях обратимся к известному соотношению Больцмана:

$$S = k \ln W, \quad (4)$$

$$w = e^{\frac{s}{k}},$$

где S — энтропия процесса, системы и т. п.; k — постоянная Больцмана; W — термодинамическая вероятность процесса, системы и т. п., всегда $\gg 1$, равная числу способов, при помощи которых могут быть мысленно воспроизведены процесс, система и т. п.

Эта формула в применении к энергетическим очагам позволяет рассчитать заранее распределение энергии очага по степеням ее интенсивности, если только заданы эти степени. Подобное распределение в применении к любому очагу энергии рудообразования и с учетом расходования ее пропорционально натуральным логарифмам коэффициентов (кларков) концентрации в руде главного металла приводит к формуле

$$E_{K_{\text{эф}}} = \frac{1}{K_{\text{эф}}} = \frac{1}{\alpha K_{\text{м}}}, \quad (5)$$

где $E_{K_{\text{эф}}}$ — порция рудообразующей энергии, «выделяемая» природой на образование руд концентрации $K_{\text{эф}}$.

Формулы (5) и (3) позволяют производить расчет запасов, поскольку (5) позволяет определить общий расход рудообразующей энергии на создание руд кондиций $K_{\text{м}}$, а (3) дает возможность знать расход той же энергии в расчете на единицу объема руды той же кондиции $K_{\text{м}}$.

Отсюда

$$P_{K_{\text{об}}} = \frac{\varepsilon \alpha K_{\text{м}}}{\varepsilon \alpha K_{\text{м}}} = \frac{1}{K_{\text{эф}} \cdot \ln K_{\text{эф}}} = \frac{1}{K_{\text{эф}}^2 \cdot \ln K_{\text{эф}}}, \quad (6)$$

где $P_{K_{\text{об}}}$ — запас руды в условных единицах объема, при заданном содержании металла в кларках концентрации $K_{\text{м}}$ и коэффициенте α .

Можно показать, что дифференциальный запас металла при заданных условиях

$$P_{K_M} = \frac{1}{K_{эф} \cdot \ln K_{эф}} \quad (7)$$

Запас металла, даваемый формулой (7), выражается в условных единицах массы металла.

Для разных металлов берутся разные коэффициенты α .

Самой общей характеристикой кривых распределения запасов (будь то объемов руды, будь то масс металла), в зависимости от содержаний металла в рудах, является принадлежность их к одному семейству положительных (право)-асимметричных кривых, свидетельствующих о закономерных соотношениях запасов при различных содержаниях и о закономерных же уменьшениях запасов с ростом содержаний в них ценных компонентов.

ПРАКТИКА ПРОВЕРКИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

К сожалению, имеется очень мало опубликованных статистических достоверно обработанных материалов по распределению запасов различных руд в зависимости от содержаний в них полезных компонентов, притом по различным металлам. Поэтому представляется невозможным привести исчерпывающие сопоставительные материалы по всем металлам и мы ограничиваемся в этом отношении лишь двумя иллюстрациями — по меди в мировом масштабе и по золоту — в масштабе месторождения Витватерсранд в Южной Африке.

Результаты сопоставления по меди (рис. 1) приводятся по данным академика В. И. Смирнова (1954) (цифры содержаний); Р. Аранги (1958)

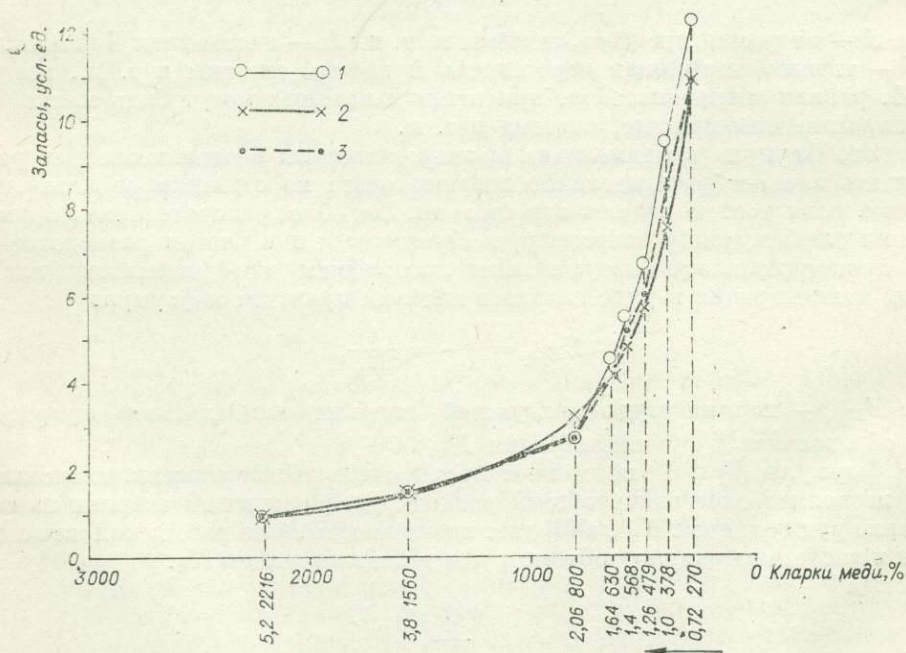


Рис. 1. Сравнительные кривые «запасы — содержание» для медных месторождений.

1 — по данным статистики Аранга (1958); 2 — по расчетной формуле $P_{K_{Cu}} =$

$$= \frac{1}{[(1,13K_{Cu}) \ln(1,13K_{Cu})]} \quad 3 - \text{то же, Н. А. Хрущева (1977).}$$

(цифры по извлечению меди за 80 лет, с 1880 по 1960 г.); Н. А. Хрущева (1977) (то же). Теоретическая кривая «запасы — содержания» рассчитана по формуле (7), в которой $K_{эф} = 1,13 K_{Cu}$. Лучшее совпадение с теоретической кривой имеет место для данных Н. А. Хрущева, где максимальное расхождение достигает по запасам всего 12% (для содержания 1%).

Результаты сопоставления по золоту (рис. 2) приводятся по Д. Криге [Krige, 1951], обработавшего и опубликовавшего данные 28334 золоторудных проб по одному из районов южноафриканского месторождения Витватерсранд. По этим данным были определены запасы металла в недрах и была построена соответствующая кривая. Затем на эту кривую была наложена теоретическая кривая запасов, исчисленная по формуле (7), в которой $K_{эф} = 1,11 K_{Au}$. На всем интервале содержаний от 12,8 до 41,8 г/т корреляция между теоретической и практической кривыми запасов золота заключена в пределах $0,924 < \rho < 0,993$, при доверительной вероятности 0,95. Помимо этого, было произведено сравнение теоретических и практических запасов в этих же пределах и полученное расхождение определялось цифрами +5,4% в пользу теоретических запасов. Помимо этого, подсчет запасов золота, оставшихся в недрах в интервале 20,4 — 4,85 г/т на момент написания статьи Д. Криге [Krige, 1951], дает цифру порядка 50% от на то время учтенных.

Следует иметь в виду, что в связи с выявленными закономерными взаимоотношениями запасов при различных содержаниях и непрерывностью кривых «запасы — содержания», для подсчета запасов нет нужды в большом количестве проб, а необходимо лишь знать интервал содержаний, от самых низших до высших, определение чего требует лишь минимума проб (50 на исследуемое рудное тело).



Рис. 2. Результаты обработки 28 334 анализов золоторудных проб (данные Криге [Krige, 1951] по Витватерсранду).

1 — диаграмма распределения проб (%) по градациям содержаний; 2 — кривая запасов золота (усл. ед.), отвечающая диаграмме распределения; 3 — то же, по теоретической формуле $P_{K_{Au}} = \frac{1}{[(1,11K_{Au}) \ln(1,11K_{Au})]}$; 4 — запасы, не вскрытые разведкой.

Содержание, дм-пенни-вес

Среднее значение по интервалам, дм-пенни-вес

То же, приведенное на 1 м, г/т

Кларки концентрации золота, рассчитанные на 1 дц³ руды

Расчетные кларки концентрации, равные $K_{Au} \cdot 1,11$



* *
*

Прежде всего необходимо обратить внимание, что приведенные статистические материалы вполне удовлетворительно коррелируются с теоретическими расчетными данными. При этом в качестве исходных были взяты, по существу, случайные статистические цифры, никак не подвергшиеся специфической предварительной обработке, а использованные теоретические расчетные уравнения получены чисто термодинамическим путем. Тем не менее между сравниваемыми материалами наблюдается вполне удовлетворительная корреляция. Это, без сомнения, говорит в пользу того, что в основе предлагаемого закономерного (вместо вероятностного) подхода к зависимости «запасы — содержания» в рудах имеется рациональное зерно. Данное обстоятельство позволяет принять упомянутый закономерный подход как рабочую гипотезу и перечислить ряд задач, которые необходимо решить в связи с этим, как в научных, так и в практических целях. Эти задачи следующие.

Необходимо выполнить массовые сравнительные расчеты по различным металлам и для разных условий, имея в виду накопление достаточных фактических материалов по использованию изложенной гипотезы в практике работ, в частности для очерчивания круга решаемых задач.

Необходимо приступить к созданию основ термодинамики геохимических процессов с установлением соответствующих параметров (в частности энтропии) для наблюдаемых в природе температур и давлений — с одной стороны, и с другой — степеней рассеяния и концентрации, имея в виду уточнение необходимых расчетов.

Определение правомочности использования при рассмотрении геологических явлений вероятностных законов (в частности, логнормального при обработке данных опробования).

Определение общего количества проб с рудного тела, гарантирующего представления в выборке всех градаций содержаний.

Выявление оптимальных условий опробования рудных месторождений.

*Всесоюзный научно-исследовательский институт
методики и техники разведки, г. Ленинград*

Л. В. ТАУСОН

МАГМАТОГЕННЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ

Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых всегда очень трудный и сложный процесс. С увеличением потребностей общества в минеральном сырье и необходимостью перехода к поискам глубокозалегающих месторождений эти трудности возрастают на несколько порядков. Они определяются рядом обстоятельств. Самым главным является то, что в земной коре основная масса атомов рудных и редких элементов находится в состоянии рассеяния в изверженных, метаморфических и осадочных горных породах и только очень небольшая их доля сконцентрирована в рудных месторождениях. При этом, с точки зрения масштабов добычи и запасов в горнодобывающей промышленности, главную роль играют крупные месторождения.

В этих отношениях весьма показателен пример меди. Среднее содержание ее в земной коре может быть определено в $5 \cdot 10^{-3}\%$ [Виноградов,

1962]. При таком уровне содержания в породах первого километра земной коры континентов должно находиться $2 \cdot 10^{13}$ т меди. По имеющимся оценкам [Govett, 1977] мировые запасы меди, при 0,5%-ном уровне ее содержания в рудах, составляют $4 \cdot 10^8$ т. Таким образом, при современном состоянии разведанности соотношение меди, сконцентрированной в месторождениях и рассеянной в породах литосферы, составляет 1 : 50 000. К этому следует добавить, что, по данным В. И. Красникова (1959), 66% промышленных запасов меди и 64% добываемой медной руды приходится на крупные месторождения, которые составляют всего 4% от числа известных месторождений этого металла. Увеличивающееся потребление меди привело к тому, что в течение XX столетия резко понизились требования к добываемым рудам. Если в начале века средний уровень содержания меди в рудах составлял 4%, то в настоящее время он снизился до 0,5 %.

Тенденция вовлечения в эксплуатацию крупных месторождений все более бедных медных руд, по-видимому, сохранится и в дальнейшем. При существующем уровне содержания меди в добываемых рудах ее коэффициент концентрирования в рудных месторождениях, по сравнению с уровнем рассеяния в породах земной коры, составляет всего 100 ($5 \cdot 10^{-1}$ и $5 \cdot 10^{-3}$ % соответственно). Этот показатель индивидуален для каждого элемента и изменяется в зависимости от требований промышленности к минимальному содержанию металла в рудах. Для меди еще в начале века он составлял 800.

По-видимому, в ближайшие годы уровень концентрирования цветных и редких металлов в рудах, равный 100—300, станет обычным при условии значительных масштабов месторождений таких небогатых руд. Это предопределяет применение в горнорудной промышленности новых технологий добычи и обогащения полезных ископаемых.

Кроме тенденции снижения качества добываемых руд не менее важен процесс перехода практической геологии к поискам глубокозалегающих месторождений. Например, в Канаде 85% разрабатывавшихся в 1955 г. рудных залежей было обнаружено с поверхности. В период же 1956—1968 гг. только 22% новых месторождений было обнаружено с поверхности, тогда как 52% было открыто на глубине [Derry, 1970].

В условиях перехода практической геологии к поискам глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых становится очевидным тезис А. Е. Ферсмана, сформулированный им еще 40 лет тому назад, о том, что проблема поисков полезных ископаемых по существу своему проблема геохимическая.

При увеличивающихся потребностях общества в минеральном сырье, снижении его качества и перехода к поискам залежей, залегающих на глубине, весьма современно звучат слова А. Е. Ферсмана (1940) о том, что необходимо коренное изменение метода поисковых работ, так как без внедрения новых геохимических идей мы не сможем достаточно быстро ответить на растущие потребности социалистического хозяйства.

Решение стоящих перед прикладной геохимией задач возможно только при условии создания ее теоретических основ, базирующихся на знании законов рассеяния и концентрирования атомов рудных и редких элементов в земной коре.

Основой теорий прикладной геохимии следует считать учение о геохимических полях рассеяния и концентрирования химических элементов в земной коре.

Рассмотренный выше пример меди показал, что количества атомов этого металла, сконцентрированные в выявленных в настоящее время запасах руд и рассеянных в горных породах, соотносятся как 1 : 50 000. По имеющимся представлениям, в интервале первого километра количество рудных залежей, не обнажающихся на поверхности земли, в 6—7 раз превышает общую массу руд, выходящих на дневную поверхность.

Если, кроме того, учесть недостаточно исследованные территории, то известные в настоящее время запасы меди могут быть увеличены, по крайней мере, в 10 раз. Иными словами, есть достаточные основания утверждать, что в земной коре в состоянии 100-кратного концентрирования должен находиться не менее чем 1 атом меди из 5000. Однако и эта величина крайне мала и показывает, что процесс интенсивного концентрирования меди весьма редок, и основной формой ее нахождения в земной коре следует считать рассеянную форму.

Вместе с тем изучение форм нахождения меди, например в изверженных горных породах, показало, что в большинстве типов изоморфные возможности ее весьма ограничены. В зависимости от типа пород и содержания меди в изоморфной форме может находиться всего от 10 до 40% ее атомов. Большая часть атомов этого металла находится в породах в неизоморфных формах нахождения. Имеющиеся данные показывают, что медь может находиться в изверженных горных породах в виде микровключений сульфидов (прежде всего халькопирита), ферритов и в породообразующих минералах в атомарно-рассеянной форме [Таусон, 1977].

Аналогичную картину мы наблюдаем и для других рудных и редких элементов. Количество атомов, находящихся в состоянии интенсивного концентрирования (100—1000-кратного), соотносится с массой атомов, рассеянной в горных породах как 1 к 1000—10000.

Естественно, что кроме геохимических полей, отличающихся интенсивным (1000—100-кратным) концентрированием элементов (промышленные рудные залежи), в природе более широко развиты геохимические поля со средним (100—10-кратное) и низким (до 10-кратного) уровнями концентрирования.

Количества рудных и редких элементов в таких геохимических полях концентрирования, по-видимому, во много раз превышают их массу в геохимических полях интенсивного концентрирования. Однако если даже принять, что в геохимических полях со средними и низкими уровнями концентрирования находится в 10 раз больше атомов рудных и редких элементов, все равно в состоянии концентрирования в земной коре будет находиться только 1 атом на 100—1000 атомов, рассеянных в горных породах.

Таким образом, в земной коре доминируют геохимические поля рассеяния (ГПР) химических элементов. Геохимические же поля концентрирования (ГПК) распространены значительно меньше.

При этом, если геохимические поля рассеяния представляют интерес с точки зрения познания закономерностей распределения вещества в земной коре, то геохимические поля концентрирования имеют решающее значение для установления закономерностей размещения в земной коре месторождений полезных ископаемых и их поисков.

Однако поскольку процессы концентрирования развиваются в природных системах, в которых доминируют процессы рассеяния, геохимические поля рассеяния и концентрирования обычно взаимосвязаны и не могут рассматриваться в отрыве друг от друга.

В настоящее время систематика геохимических полей рассеяния должна основываться на принципах геохимической типизации геологических объектов, дополненной их морфологической характеристикой.

Сказанное удобно проиллюстрировать примером гранитов.

Как известно, поля развития гранитоидов занимают на поверхности материков огромные пространства. Петрохимически и минералогически все они различаются незначительно, хотя и имеют разное происхождение.

Изучение геохимии гранитоидов интрузий позволило подразделить их на девять геохимических типов [Таусон, 1977]. Под геохимическим типом магматических горных пород вообще и гранитов в частности понимается группа пород, характеризующихся общностью условий и способа образования, что находит отражение в их приуроченности к определен-

ным геодинамическим обстановкам, сходстве химического, редкоземельного и минерального составов, а также в формировании в сходных геологических условиях рудно-магматических комплексов, близких по потенциальной рудоносности.

Сейчас ясно, что для всех магматических горных пород наиболее показательны различия содержаний в них редких элементов.

В случае гранитоидов это отражает изменчивость величины геохимического индекса гранитов — $\frac{1000}{F} \left(\frac{\text{Sr} + \text{Ba}}{\text{Li} + \text{Rb}} \right)$, которая изменяется от 0,07 в агапитовых редкометалльных гранитах до 160 в плагиогранитах толеитового ряда, т. е. более чем в 2000 раз. Каждый из выделенных геохимических типов имеет вполне определенную генетическую позицию.

При петролого-геохимическом анализе гранитных геохимических полей рассеяния геохимический тип гранитов дополняется морфологической характеристикой интрузий (абиссальные и мезоабиссальные батолиты, гипабиссальные и субвулканические интрузии), а также данными об уровне их эрозионного среза.

Это предопределяет величины содержаний (уровни рассеяния) рудных и редких элементов в неизмененных разностях гранитоидов, а также потенциальные возможности изучаемых магматических систем с точки зрения образования геохимических полей концентрирования рудных и редких элементов.

Смысл такого петролого-геохимического анализа может быть показан на примере трех типов лейкократовых гранитов. Петрохимически и минералогически они почти не различаются, что и предопределяется термином «лейкократовый гранит».

Однако при петролого-геохимическом анализе геохимические различия между лейкократовыми гранитами, относящимися к различным геохимическим типам, проявятся весьма отчетливо. Например, в лейкократовых гранитах из апикальных частей гипабиссальных интрузий плюмазитовых редкометалльных лейкогранитов будут наблюдаться весьма высокие уровни содержания фтора, лития, рубидия, олова, ниобия, тантала, вольфрама, бериллия и относительно низкие концентрации стронция и бария. У таких гранитов будет наблюдаться высокий уровень дисперсии концентраций редких элементов, а величина геохимического индекса составит 0,3—0,4.

В лейкократовых гранитах, являющихся поздними интрузивными фазами в батолитах палингенных гранитоидов известково-щелочного ряда, уровни концентраций фтора, лития, рубидия, бериллия, олова, вольфрама значительно ниже, в то время как содержания стронция и бария несколько выше. Для таких гранитов значение дисперсии концентраций указанных выше редких элементов почти на порядок меньше по сравнению с плюмазитовыми лейкогранитами, а величина геохимического индекса возрастает до 6—8.

Наконец, в лейкократовых гранитах, относящихся к геохимическому типу ультраметаморфических гранитов, уровни содержания фтора, лития, рубидия и других указанных выше элементов еще ниже, а стронция и особенно бария существенно повышаются. В результате величина геохимического индекса у них повышается до 100—110, т. е. будет отличаться от этого индекса у плюмазитовых редкометалльных лейкогранитов более чем в 300 раз.

В ряду этих трех лейкократовых гранитов только с гипабиссальными интрузиями плюмазитовых редкометалльных лейкогранитов можно ожидать формирование достаточно обширных геохимических полей концентрирования (промышленных залежей олова, вольфрама и др.).

Принципы геохимической типизации и систематики геохимически полей рассеяния могут быть применены к другим семействам извержен-

ных горных пород, а также к главным классам метаморфических и осадочных образований.

Однако не меньший интерес, особенно с точки зрения металлогении и прикладной геохимии, представляет систематика геохимических полей концентрирования. Эти поля следует разделять на эндогенные и экзогенные. Кроме того, их следует различать по уровням концентрирования: интенсивного (100-кратного и более), среднего (10—100-кратного) и низкого (до 10-кратного).

Среди эндогенных геохимических полей концентрирования, по-видимому, можно различать поля, связанные с магматическими очагами (магматогенные), деятельностью интрателлурических эманаций (интрателлурические) и вадозо-термальных растворов (гидротермально-метаморфогенные).

При анализе условий формирования магматогенных геохимических полей концентрирования необходимо иметь в виду, что длительность и многоэтапность развития поздне- и постмагматических процессов дегазации магм предопределяет множественность и полихронность образования геохимических полей концентрирования как в телах самих интрузий, так и во вмещающих их породах.

Многоэтапность процессов дегазации особенно характерна для гипабиссальных и субвулканических интрузий, с которыми генетически связывается большая часть эндогенных рудных месторождений.

В основу классификации магматогенных геохимических полей концентрирования должен быть положен принцип стадийности процессов дегазации продуктивных интрузий. С этой точки зрения магматогенные геохимические поля концентрирования целесообразно подразделить на три группы: магматический, пневматолитовый и гидротермальный этапы.

Среди ГПК магматического этапа в настоящее время можно наметить следующие их главные виды: 1) геохимические поля концентрирования в апикальных частях интрузий, образованные в результате эманационного привноса рудных и редких элементов при становлении и кристаллизации интрузий; 2) геохимические поля концентрирования, образующиеся при процессах ликвации магм; 3) эманационные ореолы интрузий во вмещающих породах; 4) минерализованные брекчированные зоны; 5) поля эманационного предрудного привноса в ослабленных проницаемых зонах; 6) зоны предрудных метасоматитов во вмещающих породах.

Геохимические поля концентрирования в апикальных частях интрузий образуются на позднемагматическом этапе, в предкристаллизационный период и в начале кристаллизации гипабиссальных и, в меньшей мере, мезоабиссальных интрузий. На этом этапе летучие компоненты магм и связанные с ними рудные и редкие элементы устремляются в апикальные части интрузий, образуя здесь поля концентрирования ряда рудных элементов (олово, вольфрам и другие). По сравнению с глубинными частями интрузий, концентрации рудных и редких элементов в их апикальных частях могут увеличиваться в 2—5 раз, а иногда и значительно больше. Дисперсии концентраций при этом возрастают обычно в 10—15 раз.

Важным следствием возникновения геохимических полей концентрирования в апикальных частях таких интрузий следует считать возможность образования в связи с ними россышных месторождений.

По-видимому, за счет обогащенных оловом апикальных частей гипабиссальных интрузий плюмазитовых редкометалльных лейкогранитов образовались элювиальные россыпи касситерита в Юго-Восточной Азии, из которых добывается основная масса олова в мире.

Геохимические поля концентрирования, образующиеся при процессах ликвации магм, хорошо известны в связи с интрузиями основных и ультраосновных изверженных горных пород. Среди них наиболее извест-

на формация медно-никелевых сульфидных руд, месторождения которой являются основным источником никеля.

Эманационные ореолы интрузий во вмещающих породах обычно образуются в связи с гипабиссальными гранитоидными интрузиями, отличающимися высоким уровнем концентрации летучих. Концентрации редких и рудных элементов в эманационных ореолах обычно превышают фоновые всего в 2—3 раза, при увеличении дисперсии в 10—15 раз. Эти эманационные ореолы обычно имеют площадной характер, часто повторяя подземный контур кровли интрузий, хотя в некоторых случаях они могут быть значительно шире, благодаря привносу во вмещающие толщи вещества, отделяющегося от интрузии еще на этапе ее подъема. Для этого типа интрузий (плюмазитовые редкометалльные лейкограниты) наиболее типичны эманационные ореолы калия, воды, фтора, олова, лития и в меньшей степени цезия, свинца и ртути.

Значительный практический интерес представляет тип минерализованных брекчированных зон. Геохимические поля концентрирования этого типа образуются обычно в связи с гипабиссальными и субвулканическими интрузиями. Морфология их различна, чаще всего они связаны с крупными вулканокупольными структурами, в пределах которых могут образовываться протяженные радиальные и концентрические зоны, а также трубообразные тела в местах их пересечения. Иногда с такими брекчированными зонами могут быть связаны значительные массы сконцентрированного вещества. В этих случаях минерализованные брекчии могут представлять объекты промышленной эксплуатации, особенно при возможности их открытой разработки.

Редкоэлементный состав минерализованных брекчий, по-видимому, зависит от геохимического типа интрузий, этапа дегазации кристаллизующегося расплава и характера последующих постмагматических процессов.

При образовании эксплозивных брекчий редкие элементы на разных гипсометрических уровнях имеют различные степени концентрирования. Например, в Сорском молибденовом месторождении [Страгис, 1976] максимальные уровни концентрирования вольфрама, цинка, серебра, висмута и марганца отмечаются в верхней части брекчий, а концентрации молибдена и меди в более глубоких частях — на 100—150 м ниже.

Поля эманационного притока в ослабленных проницаемых зонах представляют собой образования, изученные пока слабо. Обычно они образуются в пределах тектонически ослабленных зон. В них не наблюдается сколько-нибудь заметных метасоматических изменений породообразующих минералов, но возрастает содержание и особенно дисперсия концентраций ряда рудных элементов [Гаусон, 1971].

Зоны прорудных метасоматитов во вмещающих породах — весьма важный тип магматогенных геохимических полей концентрирования. Чаще они характерны для относительно глубокозалегающих гипабиссальных интрузий.

В Приморье такие зоны описаны в связи с интрузиями гранитоидов латитового ряда [Размахнин, 1973]. Здесь в полях оловорудных месторождений, надинтрузивные мезозойские флишоидные песчано-сланцевые толщи претерпевают интенсивные дорудные метасоматические изменения. Они выражаются в базификации, при которой происходит образование микролитового биотита и ощутимый привнос калия, серы, фтора, бора, олова и халькофильных элементов. Эти своеобразные породы были названы биотитовыми метасоматитами или биотититами. Выше биотититов развиваются зоны пропилитовых и березитоподобных изменений. В новообразованных биотитах накапливается значительное количество редких и рудных элементов, среди которых особенно важны олово и фтор.

Геохимические поля концентрирования, возникающие на постмагматических этапах истории рудоносных интрузий, могут образовываться мно-

гократно. Это определяется не только многоэтапностью развития постмагматических процессов, но и возможностью существования в потенциально рудоносных интрузивах нескольких очагов, в которых возможно генерирование рудоносных эманаций.

Возникающие при этом геохимические поля концентрирования можно подразделить на две группы: поля пневматолитового и гидротермального этапов. Подобное разделение особенно четко проявляется в случае гипабиссальных интрузий плюмазитовых редкометалльных лейкогранитов, для которых можно предполагать двукамерную модель формирования очагов рудоносных эманаций [Таусон, 1977].

Условия формирования полей концентрирования пневматолитового этапа во многом сходны с особенностями образования эманационных ореолов интрузий. От последних их отличают меньшие размеры, большая степень концентрирования рудных и некоторых редких элементов и достаточно тесная связь с полями интенсивного высокотемпературного рудного концентрирования (грейзены, скарны, высокотемпературные гидротермалиты).

В случае интрузий плюмазитовых редкометалльных лейкогранитов в образующихся полях концентрирования пневматолитового этапа ведущая роль принадлежит вольфраму, олову и в меньшей степени мышьяку, бериллию, рубидию, свинцу и цинку.

Формирование геохимических полей концентрирования гидротермального этапа представляется еще более сложным и многостадийным процессом.

При наиболее типичном трещинном рудоотложении процесс формирования полей концентрирования гидротермального этапа необходимо рассматривать в единстве его главных частей: формирования полей интенсивного концентрирования (промышленные рудные залежи), полей со средними уровнями концентрирования (первичные ореолы рудных тел) и гидротермального метасоматического изменения вмещающих пород, обычно с низкими уровнями концентрирования рудных и редких элементов (ореолы рудных полей).

Разным типам гидротермальных рудных месторождений свойствен свой собственный редкоэлементный спектр геохимических полей концентрирования гидротермального этапа, отвечающих ореолам рудных тел и рудных полей.

Например, в случае полиметаллических месторождений ведущими элементами ореолов рудных тел (геохимических полей концентрирования среднего уровня) являются свинец, цинк и медь; для сульфидно-касситеритовых — олово, цинк, свинец и серебро, а для вольфрамовых — вольфрам, висмут, серебро и цинк.

Во всех случаях число элементов, обладающих высоким уровнем концентрирования, незначительно. Однако не менее важным обстоятельством является и то, что высокая контрастность концентраций ведущих рудных элементов наблюдается в надрудном и рудном интервалах. По вертикали изменяются только коэффициенты контрастности концентраций. В надрудных интервалах они постепенно уменьшаются у рудообразующих элементов, в то время как у большинства элементов-спутников (серебро, медь, мышьяк, ртуть и др.) они остаются на уровне значений рудного интервала или даже несколько возрастают.

Поля концентрирования рудных элементов вокруг рудных тел следует рассматривать как своего рода рудный шлейф, так как их концентрирование в около- и надрудном пространстве рудных тел, в сущности, является продолжением рудного процесса.

Геохимические поля концентрирования, связанные с синрудными метасоматитами (ореолы рудных полей), отличаются значительно большими размерами, более широким редкоэлементным спектром и значительно меньшими уровнями концентрирования рудных и редких элементов.

Возникающие при гидротермальном метасоматозе минералы (гидро-слюды, хлориты, карбонаты и т. д.) отличаются достаточно высокой изоморфной и сорбционной емкостью. Поэтому в них в качестве примесей встречаются многие редкие элементы (литий, рубидий, цезий, стронций, барий, марганец и др.). Вместе с тем при процессах метасоматического изменения пород нередко происходит образование минералов, в состав которых входят аниогенные элементы (фтор, хлор, бор и фосфор). При сорбционных процессах, в новообразующихся минералах могут концентрироваться некоторые подвижные элементы (йод, ртуть и т. д.). Наконец, в этом типе полей концентрации обычно наблюдаются повышенные содержания рудообразующих элементов и их спутников.

Однако для всех элементов этого типа геохимических полей концентрации гидротермального этапа характерны низкие уровни концентрации, обычно не выходящие далеко за пределы первого порядка.

Множественность магматогенных геохимических полей концентрации, связанных с интрузиями изверженных горных пород, предопределяет необходимость изучения их структуры, состава и условий образования и открывает возможности разработки методов локального прогнозирования размещения геохимических полей интенсивного концентрирования (промышленных рудных залежей) в зонах влияния потенциально рудоносных интрузивов.

*Институт геохимии им. академика А. П. Виноградова
СО АН СССР, г. Иркутск*

С. В. ГРИГОРЯН, Л. Н. ОВЧИННИКОВ

О ПОИСКОВОМ И ГЕНЕТИЧЕСКОМ ЗНАЧЕНИИ ПЕРВИЧНЫХ ОРЕОЛОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Выполненные в 30-е годы работы Н. И. Сафронова по использованию вторичных ореолов рассеяния металлов при поисках рудных месторождений [Сафронов, 1936₂] положили начало бурному развитию и широкому применению в процессе поисковых работ геохимических методов. Комплекс этих методов со временем расширялся по мере появления новых высокоэффективных модификаций геохимических поисков, одним из которых является метод поисков месторождений по первичным ореолам.

Выполненными в последние годы исследованиями установлено, что особенности состава и строения первичных геохимических ореолов (ПГО) с успехом могут быть использованы при поисках рудных месторождений и особенно эффективно для обнаружения глубокозалегающих скрытых рудных тел и месторождений. Высокая эффективность использования ПГО в качестве признаков скрытого оруденения доказана производственными работами, выполненными в ряде рудных районов [Григорян, 1974]. Анализ современного состояния работ в области поискового применения ПГО показывает, что особенности состава и строения ПГО успешно могут быть использованы для решения следующих важнейших задач, возникающих при поисках и разведке рудных месторождений:

- идентификация надрудных первичных ореолов — признаков слепого оруденения;
- оценка уровня эрозионного среза рудопроявлений (оруденения, вскрытого эрозионной поверхностью);
- оценка перспектив глубоких горизонтов известных месторождений на слепое оруденение;
- отличие ПГО концентрированного оруденения от геохимических аномалий, представленных зонами рассеянной рудной минерализации;
- выявление в пределах известных рудных полей и месторождений

(обычно на глубоких горизонтах) рудных тел новых, ранее неизвестных формаций (обнаружение и расшифровка полиформационных аномалий).

В литературе описано множество примеров успешного привлечения особенностей состава и строения ПГО при решении перечисленных выше задач. Менее охарактеризованы возможности использования ПГО для оценки перспектив месторождений и рудопроявлений не только на основные ценные компоненты руд, но и для определения возможной промышленной значимости элементов-спутников.

Как известно, в настоящее время вопросам комплексного использования руд уделяется большое внимание: наряду с основными компонентами, в рудах месторождений изучается распределение широкого круга элементов-спутников. Однако эти исследования обычно проводятся только в пределах рудных тел, оконтуренных по ведущему компоненту, хотя известны случаи, когда на ряд элементов в силу их концентрации в околорудном пространстве промышленный интерес представляют первичные ореолы. Это обстоятельство ставит на повестку дня широкое использование результатов изучения ПГО при решении вопросов комплексного использования сырья. Прежде всего следует отметить необходимость учета геохимической зональности ПГО, выражающейся в закономерном смещении по вертикали друг относительно друга первичных ореолов химических элементов. Это особенно важно для элементов, поля повышенных концентраций которых располагаются за пределами рудных тел и по этой причине обычно выпадают из поля зрения при изучении вещественного состава руд. Известны примеры, когда подобные обогащенные участки тел или иных элементов в силу высоких концентраций полезного компонента имеют самостоятельное промышленное значение.

Естественно, что успешное решение задачи оценки ПГО как возможного источника новых ценных компонентов потребует определенной корректировки методики изучения ПГО. Последняя, по нашему мнению, должна заключаться прежде всего: а) в резком расширении числа определяемых в геохимических пробах химических элементов в первую очередь за счет включения в набор элементов, на которые анализируются геохимические пробы, представляющих практический интерес; б) в регулярной оценке правильности применяемых методов анализа проб. Прежде всего имеется в виду контроль широко используемого при изучении ПГО экспрессного спектрального анализа более прецизионными методами анализа проб; в) в оценке представительности применяемых методов геохимического опробования рудных тел и вмещающих их пород, поскольку при изучении ПГО обычно применяется экспрессный, но менее представительный метод опробования (штупной или метод пунктирной борозды).

Перечисленные выше задачи имеют большое практическое значение и успешно могут быть решены с помощью изучения ПГО. В последнее время наблюдается определенная тенденция усиления работ по внедрению ПГО в практику геологоразведочных работ, и тем не менее следует отметить, что существующие масштабы практического использования методики ПГО все еще не отвечают ее значительным потенциальным возможностям. Так, в настоящее время перечисленные выше задачи с помощью ПГО более или менее успешно решаются практически только в условиях открытых районов, где ПГО или фиксирующие их вторичные остаточные ореолы рассеяния элементов-индикаторов выявляются непосредственным опробованием коренных пород или элювиальных отложений на поверхности. В закрытых же районах, где рудоносный фундамент перекрыт чехлом рыхлых отложений, ПГО практического применения не нашли. Вот почему разработка и внедрение в производство геологоразведочных работ рациональной методики использования ПГО при поисках рудных месторождений в условиях закрытых районов представляют собой актуальнейшую проблему теории и практики геохимических поисков.

В условиях закрытых районов ПГО должны быть использованы на этапе детальных работ, которые обычно ставятся в пределах перспективных участков, выделенных по результатам предшествующего этапа геолого-геофизических работ. Отметим, что в последнее время для локализации перспективных участков все чаще применяются геохимические методы — прежде всего атомохимические и метод наложенных эпигенетических ореолов рассеяния элементов-индикаторов.

Учитывая возможности ПГО, можно рекомендовать бурение в пределах выделенных перспективных участков короткометражных (картировочных) скважин с ограниченной забуркой в коренные породы. Основное назначение этих скважин — уточнение геологического строения рудоносного фундамента, выявление и оценка геохимических аномалий в рудоносном фундаменте, поскольку вскрытие этими скважинами возможных рудных тел маловероятно из-за редкой сети бурения. По этой же причине при обработке результатов геохимического опробования керна скважин необходимо широкое использование различных приемов усиления аномалий, способствующих повышению надежности выявления и интерпретации геохимических аномалий.

Для усиления ПГО наряду с построением мультипликативных аномалий рекомендуется использование метода анализа тяжелых фракций геохимических проб. Опытными работами установлено, что по этому методу удается выявить более широкие и контрастные ПГО: размеры ореолов «увеличиваются» более чем в 10 раз, что, по существу, равносильно разрежению во столько же раз сети картировочных скважин. В этом смысле значение метода анализа тяжелых фракций геохимических проб при поисках в закрытых районах трудно переоценить. Методические вопросы использования результатов анализа тяжелых фракций для усиления геохимических аномалий освещены в ряде публикаций [Григорян, 1974] и здесь не рассматриваются. Отметим только, что, как установлено в последнее время, метод анализа тяжелых фракций геохимических проб обладает еще одним в практическом отношении весьма важным преимуществом: зональность в строении ПГО в модификации тяжелых фракций существенно контрастнее. Для иллюстрации этого положения на рис. 1 приведены графики изменения с глубиной мультипликативного коэффициента зональности ПГО полиметаллического месторождения Мироновское (Киргизская ССР), ПГО которого авторами изучено совместно с Г. Г. Гулиевым. Как следует из рис. 1, зональность ореолов, выявленных по результатам анализа тяжелых фракций геохимических проб, почти на два порядка контрастнее (в сравнении с результатами анализа валовых геохимических проб).

В закрытых районах, где геохимические аномалии в рудоносном фундаменте выявляются по результатам геохимического опробования керна картировочных скважин, можно рекомендовать комбинированное применение двух наиболее эффективных методов усиления аномалий: метода анализа тяжелых фракций с последующим построением мультипликативных аномалий. Привлечение всего арсенала существующих приемов изучения ПГО в закрытых районах представляется необходимым прежде всего потому, что интерпретация выявленных в рудоносном фундаменте геохимических аномалий представляет собой последнее звено в цепи процедуры оценки рудоносности участков, после чего следует проверка горно-буровыми работами аномалий, признанных перспективными. Это обстоятельство, а также относительная дороговизна проверочных работ в условиях закрытых районов предъявляют особые требования к надежности методики интерпретации геохимических аномалий.

Как известно, одним из важнейших аспектов практического использования ПГО является оценка уровня эрозионного среза геохимических аномалий на основе геохимической зональности ПГО. В настоящее время наиболее детально изучены ПГО рудных тел. При этом установлено, что

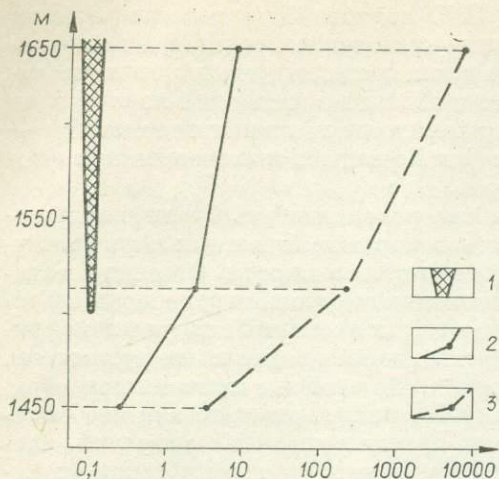


Рис. 1. Графики изменения с глубиной величин мультипликативных коэффициентов зональности первичных ореолов.

1—рудная зона; 2, 3—графики мультипликативного коэффициента $\left(\frac{Ag \cdot Pb \cdot Zn}{Co \cdot Mo \cdot W}\right)$, рассчитанного по валовым анализам (2) и по результатам анализа тяжелых фракций (3).

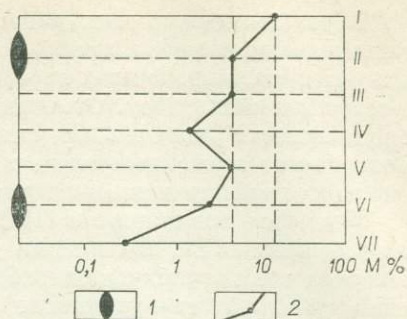


Рис. 2. График изменения с глубиной линейной продуктивности первичного ореола свинца.

1 — рудное тело; 2 — график линейной продуктивности ореола свинца. Римские цифры — номера горизонта опробования.

химической зональности ПГО обычно используется для оценки уровня эрозионного среза только одного конкретного рудного тела и его ореолов, тогда как в практическом отношении важнее оценивать уровень эрозионного среза рудоносной зоны в целом. Это особенно важно для месторождений цветных и редких элементов, характеризующихся кулисным расположением рудных тел. Речь идет о существенном увеличении глубинности оценки первичных ореолов на основе их геохимической зональности путем перехода от оценки ореолов единичного рудного тела к оценке в целом рудоносной зоны, представляющей собой группу рудных тел, сменяющих друг друга по вертикали.

Очевидно, что для разработки эффективных критериев оценки уровня эрозионного среза рудоносной зоны в целом необходимо детальное изучение особенностей состава и строения ПГО не только отдельных, изолированных в пространстве рудных тел, но и ПГО самой рудоносной зоны, включающей в себя первичные ореолы слагающих рудоносную зону рудных тел. Подобные исследования, выполненные авторами на различных по составу и условиям формирования месторождениях, позволили установить определенные различия в строении ПГО отдельных рудных тел и рудоносных зон в целом. Эти геохимические различия могут быть использованы для выбора надежных коэффициентов зональности для оценки уровня эрозионного среза рудоносных зон и на этой основе увеличения глубинности прогноза по геохимической зональности ПГО. Так, для некоторых надрудных элементов была выявлена определенная связь между интенсивностью их надрудных ореолов и гипсометрическим положением соответствующего рудного тела в пределах рудоносной зоны: чем выше рудное тело, тем интенсивнее их надрудные ореолы и наоборот (при прочих равных условиях). Для иллюстрации этого положения приведен график изменения с глубиной линейной продуктивности первичного ореола свинца (рис. 2) — характерного индикатора надрудных элементов редкометального месторождения, которое в исследованном разрезе представлено двумя слепыми рудными телами, расположенными одно над другим. Как следует из рис. 2, надрудная часть каждого из рудных тел

характеризуется отчетливым максимумом линейной продуктивности ореола свинца (горизонты I и V). При этом продуктивность надрудного ореола верхнего (меньшего по размерам) рудного тела существенно больше (по сравнению с нижним телом). Эти данные показывают, что зональность ПГО каждого из рудных тел развивается на фоне зональности рудоносной зоны, которая в данном случае может быть использована для оценки уровня эрозионного среза рудоносной зоны в целом. Существование зональности двух порядков (рудных тел и рудоносной зоны в целом) отчетливо видно на рис. 2: общая тенденция монотонного уменьшения продуктивности ореола свинца с глубиной нарушается резким перегибом над нижним рудным телом, что фиксирует проявление «локальной» зональности ПГО конкретного рудного тела.

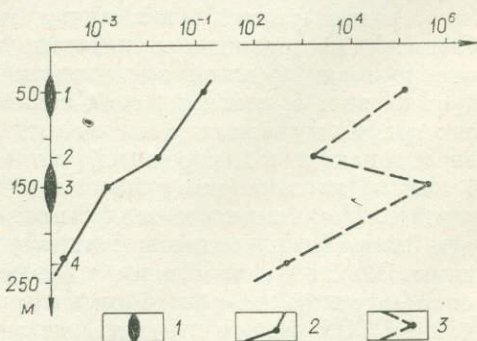
Естественно, что наиболее эффективными индикаторами оценки уровня эрозионного среза рудоносных зон будут элементы, в строении ореолов которых проявляется только геохимическая зональность рудоносных зон (зональность первого порядка), ибо проявление более локальной зональности (второго порядка) затрудняет практическое использование критерия зональности из-за нарушения монотонного характера изменения с глубиной параметров ореолов. Таким элементом, как показали исследования, является барий — один из важнейших элементов-индикаторов зональности ПГО различных типов эндогенных рудных месторождений.

Барий проявляет отчетливую тенденцию преимущественного накопления в верхних частях рудоносных зон, в отличие от остальных надрудных элементов (сурьма, серебро и др.), которые образуют отчетливые «папки» над каждым рудным телом и не проявляют отчетливо выраженной зональности первого порядка. Благодаря этому, изменение с глубиной коэффициентов зональности, использующих барий (в сочетании с другими элементами), более монотонно (однаправленно). Исключение бария из коэффициента приводит к возникновению резких перегибов в графиках коэффициента зональности, фиксирующих зональность ПГО каждого из рудных тел. Для иллюстрации этого положения на рис. 3 приведены графики изменения с глубиной мультипликативных коэффициентов зональности ПГО по одному из разрезов через полиметаллическое месторождение Стрежанское (Рудный Алтай), ореолы которого авторами изучены совместно с Г. Э. Федотовой. Как видно, график мультипликативного коэффициента геохимической зональности ПГО без участия бария на уровне пережима оруденения дает резкий перегиб, отчетливо отражая кулисное расположение рудных тел. В отличие от этого график коэффициента с участием бария практически не реагирует на кулисный характер оруденения и является строго монотонным.

Описанное выше специфическое распределение бария не случайно и определяется тем, что его наиболее распространенный в природе минерал представлен баритом, который обладает ретроградной растворимостью в воде. Начало ретроградной растворимости барита приходится на 250°C [Strubel, 1968]. Это означает, что на месторождениях, формирование кото-

Рис. 3. Графики изменения с глубиной величин мультипликативного коэффициента зональности первичных ореолов.

1 — рудное тело; 2 — график коэффициента с участием бария $\left(\frac{\text{Ba} \cdot \text{Ag} \cdot \text{Pb}}{\text{Cu}^2 \cdot \text{Zn}}\right)$; 3 — график коэффициента без бария $\left(\frac{\text{Ag} \cdot \text{Pb} \cdot \text{Zn}}{\text{Ni} \cdot \text{Mo} \cdot \text{Co}}\right)$.



рых происходило при температурах ниже 250°C, в строении ореолов бария будет установлена только зональность второго порядка. В тех же случаях, когда месторождения формировались при более высоких температурах (к таким относится подавляющее большинство эндогенных месторождений), с понижением температуры (ниже 250°C) барит вновь растворяется и переотлагается в более холодных участках околорудных пород, т. е. в первичных ореолах, обуславливая зональность первого порядка. Нет сомнений, что первоначально барий, подобно другим надрудным элементам (сурьма, серебро и др.), образовывал надрудные ореолы над каждым кулисно расположенным рудным телом (зональность второго порядка), но потом по мере понижения температуры вновь растворялся и переотлагался в более удаленных верхних частях рудоносных зон, образуя своеобразные надрудные «шапки» над рудоносной зоной (зональность первого порядка). Важность разработки геохимических критериев дифференциальной оценки уровня эрозионного среза ПГО рудных тел и рудоносных зон обуславливает необходимость усиления работ по изучению геохимической зональности ПГО.

Изучение ПГО рудных месторождений прежде всего преследует цель разработки методики поисков. Однако, как показывают результаты обобщения данных изучения ПГО различных по условиям формирования месторождений, ПГО несут и ценную генетическую информацию.

Первичный геохимический ореол — неотъемлемая часть любого месторождения: закономерности его состава и строения несут в себе незаменимую информацию об условиях образования месторождения, его происхождения. Генетическое значение ПГО по своей важности иногда может превосходить непосредственно поисковое, определяя тактику и стратегию поисков промышленных месторождений определенного генетического типа. ПГО, например, различно характеризуют такие широко распространенные генетические группы сульфидных месторождений, как непосредственно связанные с вулканизмом (Урал, Алтай, Кавказ), с одной стороны, и образующие стратиформные залежи в осадочных породах (Казахстан, Средняя Азия, Урал) — с другой.

В тех и других ПГО и рудные тела — единое целое, границы между ними зачастую определяются только экономически. Размеры ПГО огромны (1—10 км³ и более), главные запасы металлов сосредоточены в них. На субвулканических (вулканогенно-метасоматических) месторождениях ПГО симметричны, распространяются над рудой по вертикали до 1 км. ПГО вулканогенно-осадочных месторождений пластообразной формы (распространение в плоскости рудного горизонта до 0,5—1,0 км от руды) осложнены отходящими вглубь воронкообразными столбами вдоль рудоподводящих каналов; надрудная часть практически отсутствует. Для иллюстрации обусловленных генезисом специфических особенностей ПГО этой группы месторождений на рис. 4 в разрезе изображены ПГО вокруг Главной рудной залежи медноколчеданного месторождения Уруп. В отличие от типично гидротермальных месторождений по описываемому разрезу надрудные ореолы практически отсутствуют. Весьма интенсивны подрудные ореолы, развитые в лежачем боку рудной залежи. Генетические особенности месторождения находят однозначное отражение также в характере геохимической зональности рудной залежи и ее ПГО. Как следует из рис. 4, геохимическая зональность на месторождении симметрична: график мультипликативного коэффициента геохимической зональности «провалом» в центральной части разреза фиксирует рудоподводящий канал, по мере же удаления в стороны коэффициент постепенно возрастает. Напомним, что если бы описываемая залежь своим возникновением была обязана гидротермальному процессу, то график коэффициента геохимической зональности имел бы монотонно восходящий вид, как это условно показано на рис. 4 (пунктирная линия). Важное генетическое значение ПГО в данном случае станет очевидным, если принимать во внима-

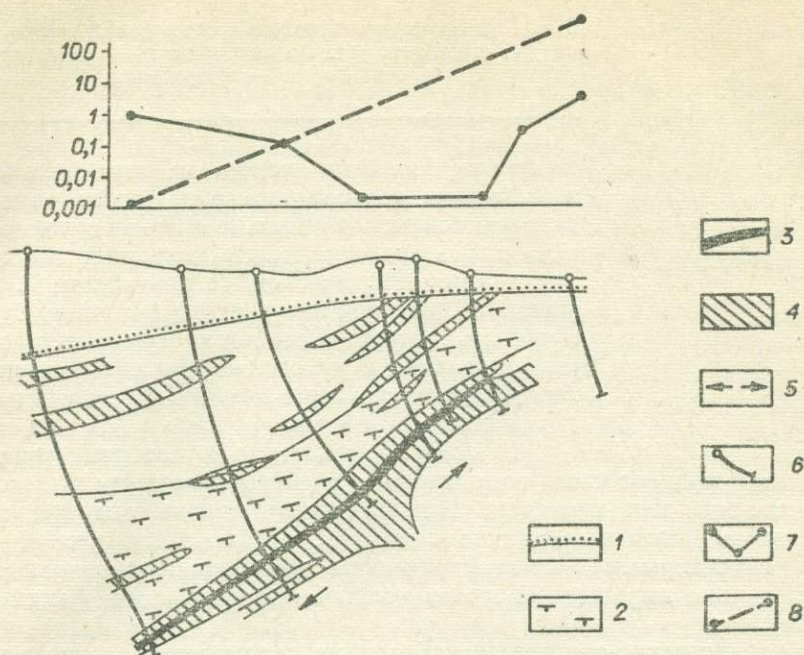


Рис. 4. Мультипликативные ореолы и графики изменения коэффициента геохимической зональности. Месторождение Уруп, Главная рудная залежь (по Н. В. Резникову).

1 — граница пород нижней юры и девона; 2 — девонские туфы среднего состава; 3 — рудная залежь; 4 — мультипликативные первичные ореолы (Cu·Zn·Pb·Ag·Mo·Co·As); 5 — направление движения рудоносных растворов; 6 — буровые скважины; 7 — график коэффициента геохимической зональности $\left(\frac{\text{Zn} \cdot \text{Pb} \cdot \text{Ag}}{\text{Cu} \cdot \text{Co} \cdot \text{Mo}}\right)$; 8 — условный график коэффициента зональности ореолов гидротермального оруденения.

ние сложность идентификации вулканогенно-осадочных месторождений и, как следствие, возникновение острых научных дискуссий по генетическим вопросам, особенно в случаях конвергентных месторождений, яркими представителями которых, как известно, являются колчеданные месторождения.

На стратиформных месторождениях в карбонатных и терригенно-карбонатных толщах образуются согласные ПГО, обычно выходящие за пределы продуктивного горизонта, свидетельствуя о наложенном оруденении. При наличии во вмещающем пласте рассеянных сингенетических сульфидов (свинца, цинка, серебра и других металлов) в связи с рудными телами может наблюдаться эпигенетическое их перераспределение с резким падением содержания в отдельных участках карбонатной толщи и формированием ПГО непосредственно вокруг рудных тел. Характерным примером использования особенностей ПГО для решения генетических вопросов могут служить результаты геохимических работ, выполненных авторами на стратиформном свинцово-цинковом месторождении Сумсар. На рис. 5 изображены соответствующие кривые распределения содержания цинка в продуктивной карбонатной толще на месторождении Сумсар (рис. 5, а) и за его пределами на фоновом участке (рис. 5, б). Анализ особенностей этих кривых позволяет высказать определенные суждения о генезисе месторождения Сумсар. На участке месторождения в отличие от фоновой кривой распределения характеризуется тремя максимумами: средний отвечает моде сингенетического рассеянного содержания цинка, что подтверждается кривой фоновой участка. Правая мода отвечает рудным телам и окаймляющим их первичным ореолам, а левая фиксирует зоны интенсивного «выноса» цинка из продуктивных карбонатных пород. Как показали результаты детального литохимического опробования продуктивной

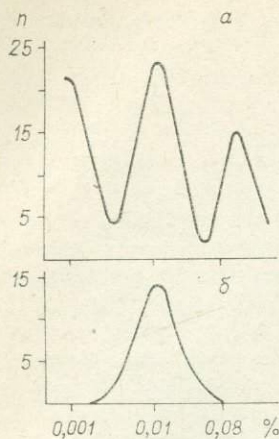


Рис. 5. Кривые распределения содержаний цинка в ореоле (а) и на фоне (б). По оси ординат — число проб, по оси абсцисс — содержания.

пачки карбонатных пород, на значительном ее протяжении зоны выноса рудогенных элементов встречаются исключительно в связи с концентрированным оруденением, что позволяет делать вывод о диплогенетическом (в понимании Т. Ловринга, 1963) генезисе месторождения Сумсар, сущность которого сводится к гидротермальной «мобилизации» в рудные залежи металлов из карбонатных пород, сингенетично обогащенных рядом рудных элементов.

В ПГО вулканогенно-метасоматических месторождений привнос часто сопрягается с не менее массовым выносом таких металлов, как марганец, ванадий, хром, никель, скандий, титан, иногда вновь накапливающихся в верхах. Наблюдается тесная связь ПГО с гидротермально-метасоматическим изменением рудовмещающих пород при явно выраженной геохимической специализации фаций метасоматитов.

Пространственно-статистический анализ параметров ореолов различных элементов при массовом опробовании дает обильную и весьма глубокую информацию не только о процессах, совершающихся в околорудном пространстве, но и для суждения об источниках рудного вещества, генезисе месторождения и механизме его формирования.

В настоящей статье авторы не ставили перед собой задачу убеждать читателей в вулканогенно-осадочном генезисе Урупского месторождения или же в диплогенетической природе рудных залежей в карбонатных породах. Назначение приведенных выше примеров в показе высокой информативности ПГО в решении задач генезиса рудных месторождений с целью привлечь внимание специалистов к ПГО как источнику ценнейшей генетической информации.

*Институт минералогии, геохимии
и кристаллохимии редких элементов, г. Москва*

В. В. ПОЛИКАРПОВИЧ

ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ БОЛЬШИХ ТЕРРИТОРИЙ ПРИ ПОИСКОВЫХ РАБОТАХ

Первоначально анализ на рудные элементы был применен Н. И. Сафроновым (1933) для решения частной задачи — разбраковки геофизических аномалий. Это было необходимо в связи с тем, что геофизические (в особенности электрические) аномалии возникают по различным причинам, и рудные аномалии составляют среди них небольшой процент. Но очень скоро в известной статье Н. И. Сафронова (1936), в которой рассматриваются принципиальные основы геохимических методов поисков, круг задач, решаемых с их помощью, был расширен, и в настоящее время мы встречаемся с разветвленной сетью этих методов.

Одной из важнейших проблем практической геохимии является изучение больших территорий. С ней приходится сталкиваться при геологических съемках и поисках месторождений полезных ископаемых. Имеет она значение и в других областях применения геохимических данных —

для районирования микроэлементных удобрений, выявления биогеохимических провинций и очагов эпидемических заболеваний, изучения загрязнения и охраны окружающей среды.

Опыт поисковых работ показывает, что необходимо сплошное покрытие территорий геохимическими съемками. Нельзя ограничивать геохимические съемки только отдельными площадями, ориентируясь в выборе этих площадей на геологические критерии. Следует иметь в виду, что геологические критерии несовершенны. Ошибки часто имеют место даже в предсказании месторождений известных типов. Совершенно невозможно или очень трудно предсказать на их основе месторождения неизвестных типов.

Ценность данных, получаемых при геохимических съемках, заключается в том, что они имеют характер прямых поисковых признаков — определяются промышленно-ценные элементы и их спутники, тесно связанные с ними в своем распространении. Эти признаки обнаруживаются одинаковым образом независимо от того, связаны ли они с месторождениями известных или еще не изученных типов, залегающих в непредвиденной геологической обстановке. Существенно также, что данные имеют количественный характер, в результате чего создается возможность количественных оценок оруденения.

Поэтому покрытие территорий геохимическими съемками следует проводить без изъятия тех или иных их частей по геологическим соображениям. Исключение составляют лишь площади, на которых применение имеющихся геохимических методов неэффективно — главным образом вследствие большой мощности покрова пострудных отложений. Но и в этом случае следует проявлять осторожность. Глубинность геохимической съемки может оказаться большей, чем предполагается, и лучше выполнить некоторый объем лишних работ, чем потерять возможность использования геохимических данных в этих трудных поисковых условиях. Кроме того, геохимические данные представляют интерес для обнаружения признаков месторождений в самом покрове.

Геологические, а также геофизические критерии выборочного опробования следует применять лишь для определения очередности вовлечения площадей в геохимические съемки. То же самое относится и к некоторым геохимическим критериям — например, потенциальной рудоносности магматических интрузий. Признаки потенциальной рудоносности дают возможность предсказать оруденение лишь с некоторой вероятностью, и поэтому независимо от этой оценки, безусловно, очень важны данные по реальной рудоносности. Для определения очередности имеют значение также экономические соображения и сроки освоения территорий, предусматриваемых народнохозяйственными планами.

Наиболее подходящий способ геохимического изучения больших территорий — съемка по потокам рассеяния, главным образом речным. Этот метод как нельзя лучше приспособлен для указанной цели, прежде всего потому, что допускает опробование с малой плотностью и, следовательно, создает возможность проведения съемок в короткие сроки при реальных темпах и вполне выполнимых ежегодных объемах работ.

Практически нет районов, где этим методом нельзя было бы воспользоваться, так как сток вод в виде постоянных или временных потоков происходит повсеместно. Не составляют исключения и аридные, пустынные и полупустынные, районы. Постоянные реки здесь очень редки, и это главным образом большие реки. Но сухие долины и промоинные формы, представляющие собой следы действия временных водных потоков, образующихся в результате редких, но сильных ливней, широко распространены.

Другой способ геохимических съемок в аридных районах — по эоловым потокам рассеяния. На площадях распространения озер, например в некоторых северных районах (Карельский, Норильский и другие), где встречаются многочисленные озера ледникового происхождения, геохими-

ческая съемка может проводиться по конечным бассейнам стока, с опробованием озер.

Кроме возможности проведения опробования с малой плотностью, к достоинствам геохимических съемок по потокам рассеяния относятся их повышенная глубинность, обусловленная тем, что в реки попадает не только материал, сносимый по поверхности, но и вещества, поступающие в растворе со стоком выклинивающихся в реки подземных вод. Поэтому метод потоков применим не только в горно-складчатых районах, но и на равнинных платформенных территориях с широко распространенными покровными отложениями. Наиболее благоприятные возможности в этих условиях имеются там, где покровные отложения полностью прорезаются долинами рек. Но и при более мощном покрове и малой глубине вреза рек возможности эффективного проведения съемок по потокам создаются в результате восходящей миграции растворенных веществ, соединенной с боковым переносом их в реки.

В аридных районах поднятию веществ к поверхности с образованием здесь наложенных ореолов способствует интенсивная инсоляция. Из этих ореолов вещества разносятся ветром, и таким образом становится глубинным метод золотых потоков рассеяния. Можно полагать, что в составе рыхлого материала, находящегося в закрепленном состоянии или переносимого ветром, отражаются породы, залегающие под покровом. На площадях, занятых ледниковыми отложениями, глубинность обуславливается заимствованием реками веществ из ледниковых потоков рассеяния.

Геохимические съемки по потокам рассеяния позволяют получить следующие результаты.

1. Выясняется геохимическая и металлогеническая специализация районов. Можно сказать, месторождения каких металлов и в каких частях изучаемой территории могут быть встречены.

2. Фиксируются аномалии, соответствующие известным месторождениям и рудопроявлениям. Это необходимо для подтверждения эффективности применяемого метода съемки. Кроме того, по геохимическим данным может быть сделана сравнительная оценка различных минерализованных площадей, что имеет значение при выборе объектов для дальнейших геологоразведочных работ.

3. Выявляются новые месторождения и площади, также с количественной оценкой, позволяющей сравнивать их друг с другом и с изученными промышленными объектами.

4. Устанавливаются закономерности размещения месторождений полезных ископаемых через связанные с ними геохимические аномалии.

Опыт проведения геохимических съемок показывает, что они являются чрезвычайно эффективным способом изучения особенностей пространственного размещения месторождений. Это объясняется тем, что геохимические признаки месторождений фиксируются чаще, чем визуальные геологические и минералогические признаки. Там, где визуальные наблюдения дают лишь отдельные пункты или изолированные участки с проявлением рудной минерализации, геохимической съемкой прослеживаются сплошные полосы повышенных концентраций металлов. Количественный характер данных позволяет выделить в них обогащенные узлы и интервалы.

Результаты геохимических съемок частично подтверждают закономерности размещения месторождений, устанавливаемые по геологическим данным, частично же они указывают на совершенно новые закономерности, которые при геологическом анализе не были замечены. Часть признаков, выводимых из геологических представлений, геохимическими данными не подтверждается, и это ставит их под сомнение.

Удается установить интересные факты. Например, очень часто фиксируются два направления, контролирующее положение геохимических аномалий и месторождений, — совпадающее с простиранием пликатив-

ных структур и секущее, причем по геохимической и металлогенической специализации они не вполне идентичны. По геологическим данным обычно отмечается одно из этих направлений, но внимательный анализ, после получения геохимических выводов, позволяет подтвердить геологическими или совместно геологическими и геофизическими данными и второе направление. Наиболее крупные месторождения нередко располагаются «на крестах» — при пересечении указанных направлений. В районах распространения вулканогенных отложений отмечается кольцевая структура геохимических аномалий, соответствующая крупным вулканоплутоническим структурам.

Выявляемые по геохимическим данным признаки размещения месторождений представляют большой теоретический интерес. Можно надеяться, что на этой основе получит новый стимул развитие металлогенического анализа. Но они очень важны и в практическом отношении. Не всегда имеются достаточно благоприятные условия для образования аномалий, фиксируемых при геохимических съемках. Выявляемые закономерности позволяют обратить внимание на те участки с трудными поисковыми условиями, которые расположены на контролирующих оруденение направлениях. Большое значение имеет выяснение закономерностей размещения оруденения тогда, когда между двумя открытыми площадями располагается закрытая или выявление проходит хотя бы по слабым геохимическим аномалиям на полностью закрытой площади.

Размеры территорий, подлежащих сплошной геохимической съемке, очень велики. Приведем данные по Сибири и Дальнему Востоку (км²):

Якутская АССР — 3,1 млн.	Камчатская область — 472 тыс.
Красноярский край — 2,4 млн.	Читинская область — 432 тыс.
Хабаровский край и	Бурятская АССР — 351 тыс.
Амурская область — 1,3 млн.	
Магаданская область — 1,2 млн.	Приморский край — 166 тыс.
Иркутская область 768 тыс.	Сахалинская область — 87 тыс.

Ключевым вопросом, определяющим возможность проведения геохимической съемки на этих территориях, является плотность опробования. В настоящее время принято считать, что на первом этапе достаточно плотность 1 проба на 1 км², что приравняется к 1 : 200 000 масштабу. В результате этой съемки выделяются перспективные площади, соответствующие рудным полям и отдельным месторождениям, и определяются направления дальнейших поисковых работ.

Однако при указанной плотности объемы работ получаются слишком большими. Поэтому возможность проведения геохимической съемки значительных территорий в короткие сроки зависит от того, до какой степени можно допустить уменьшение плотности опробования, не теряя вместе с тем возможности получения достаточно информативных результатов.

Имеющиеся данные позволяют считать, что в начале плотность может составлять 1 пробу на 5—10 км² (масштаб 1 : 500 000) и что съемка с плотностью 1 проба на 20—30 км² (1 : 1 000 000) тоже дает интересные, хотя и менее детализированные сведения.

Приводимые здесь масштабы съемок довольно условны. При указанных плотностях на 1 см² карты масштабов 1 : 200 000—1 : 1 000 000 приходится от 2—2,5 до 4—5 точек опробования. Плотность опробования удобно обозначать простой дробью, в числителе которой указывается число проб, а в знаменателе — площадь, на которую они приходятся. От этого способа легко перейти к выражению плотности в виде целых чисел и десятичных дробей, обозначающих количество проб на 1 км². Плотность опробования при геохимической съемке 1 : 200 000 (1 проба на 1 км²) получает обозначение 1/1 (или 1) масштаба 1 : 500 000—1/5 и 1/10 (или 0,2—0,1), масштаба 1 : 1 000 000—1/30—1/50 (0,03—0,02).

При указанных малых плотностях получают вполне приемлемые объемы работ. Например, для территории Якутской АССР при плотности 1/10 требуется около 300 тыс. проб, при плотности 1/30—100 тыс. проб, а для Иркутской области — соответственно 75 и 25 тыс. проб. При надлежащей организации эти работы могут быть выполнены в течение короткого периода (3—5 лет).

В результате съемок с малыми плотностями мелкие объекты пропускаются, не гарантируются обнаружения месторождений, но выявляются рудные районы и крупнейшие, контролирующее их расположение, структуры. На этой основе могут быть выбраны районы сосредоточения дальнейших поисковых работ, в чем и заключается цель первоначальных мелкомасштабных геохимических съемок.

В пределах этих районов основным геохимическим методом поисков остается съемка по потокам рассеяния, но плотность опробования сплошь по всему району доводится до 1/1, а на наиболее перспективных площадях — до 5—10 проб на 1 км² и более. Опробование по потокам с большой плотностью необходимо для выявления всех аномалий, которые могут представить практический интерес, и количественной оценки оруденения. Имеется в виду также, что выявление большого числа аномалий способствует установлению закономерностей размещения оруденений.

Затем переходят к съемкам по вторичным и первичным ореолам рассеяния с опробованием соответственно рыхлых склоновых отложений и коренных пород.

Таким образом, в данном случае осуществляется прогрессивный принцип поисковых работ — от обнаружения рудных районов к обнаружению месторождений, тогда как обычно сначала выявляются месторождения и лишь потом постепенно оконтуриваются рудные районы.

При малых плотностях опробования важнейшее значение приобретает вопрос транспортировки, так как основное время тратится на передвижение между точками отбора проб, и в условиях бездорожья это составляет главную трудность работы. В зависимости от транспортных условий могут быть применены: 1) автомобильный и мотоциклетный транспорт, причем точки опробования выбираются в зависимости от сети дорог и допустимых для мотоциклов троп, на пересечении их с реками; 2) водный транспорт — путем базирования опробовательских отрядов на катерах с малой осадкой, от которых рассылаются вверх по течению и в боковые притоки моторные и весельные лодки, в том числе обеспечивающие наибольшую проходимость резиновые надувные; 3) вертолетный — в десантном варианте, с обработкой площадей из временных лагерей и затем переброской десантов на новую площадь, и в варианте с высадкой пробыщиков на точках опробования.

В условиях, когда большая часть времени тратится на передвижение, целесообразно отбирать на каждой точке несколько видов проб, в результате чего повышается надежность и информативность геохимической съемки. Например, можно брать пробы литогеохимическую из речных илов (или несколько из различных гранулометрических фракций), гидро- и биогеохимическую, а также шлиховую. Шлиховое опробование можно проводить в упрощенном варианте — с взятием проб малого веса и их промывкой до серого шлиха в расчете на последующий спектральный анализ. Чтобы уменьшить объем аналитических работ, можно практиковать обязательный анализ одной из литогеохимических и гидрогеохимической проб, а от анализа остальных проб воздерживаться до тех пор, пока в этом не возникнет прямая необходимость.

Следует иметь в виду, что различные виды опробования не просто повторяют друг друга, в каждом из них заключена дополнительная информация. В гидрогеохимических данных лучше отражаются элементы, хорошо мигрирующие в водах, и могут более рельефно выглядеть аномалии, связанные с глубоко залегающими месторождениями. Шлиховое и шлихо-

геохимическое опробование повышает надежность обнаружения месторождений с тяжелыми химически и механически устойчивыми минералами. Биогеохимическое опробование может иметь значение для проведения съемок по потокам (а также по ореолам) в зимнее время. Этот вариант работ представляет особенный интерес вследствие того, что в зимнее время повышается проходимость местностей и могут быть применены лыжи, т. е. более просто решается транспортный вопрос.

При поисках по эоловым потокам рассеяния следует отбирать два вида проб — с различной крупностью материала. Мелкий материал переносится ветром на большие расстояния, и путем опробования его даже по редкой сети легко устанавливается наличие месторождений, но трудно указать их конкретное местоположение, а по пробам крупного материала оно определяется более точно.

Весьма перспективны для геохимического изучения больших площадей аэрогеохимические методы поисков. В этом случае идеально решается проблема транспортировки, и съемка, ведущая к обнаружению месторождений и рудных районов, может быть выполнена быстро. Успешные результаты при разработке аэрогеохимических методов получены как в нашей стране («Геофизика»), так и за рубежом [Barringer, 1969; Вейсс, 1973]. Разработка ведется в двух направлениях — с использованием анализа газовых компонентов атмосферы, являющихся индикаторами месторождений полезных ископаемых (ртуть, йод, сернистые, углеводородные газы и т. п.) и с анализом аэрозолей. Второй способ имеет то преимущество, что позволяет определять широкий круг элементов, как при литогеохимической съемке. В составе аэрозолей присутствуют механические частицы, эродированные ветром, и частицы биологического происхождения, выделяемые в атмосферу растениями. Анализ того и другого материала представляет интерес, так как он может отражать наличие месторождений.

Еще два момента чрезвычайно важны для проведения геохимических съемок больших территорий.

Во-первых, крайне необходимо применение современных методов математической обработки данных. Конечным результатом съемок являются геохимические карты. До сих пор как частные, так и сводные карты по результатам геохимических работ составлялись главным образом вручную. Ручное составление очень трудоемко, встречает технические трудности и не обеспечивает надлежащего качества карт.

Следует иметь в виду, что в результате поисковых геохимических работ обычно получается большой объем данных, измеряемый тысячами и десятками тысяч проб, каждая из которых проанализирована на многие химические элементы. Справиться с обработкой этого материала вручную практически невозможно.

Поэтому необходимо применение ЭВМ с максимальной автоматизацией обработки и машинным построением карт. Обработка на ЭВМ по подходящим программам дает карты значительно лучшего качества, на них начинает обозначаться целый ряд аномальных участков, пропускаемых при ручной обработке, и гораздо более наглядно выражены особенности размещения аномалий. Некоторые геохимические карты, для составления которых необходимо одновременно удерживать в памяти данные по многим элементам, для множества точек, вообще не могут быть изготовлены вручную.

Из имеющихся методов обработки геохимических данных на ЭВМ с автоматическим построением карты хорошие результаты дает метод многомерных полей (МП). В дальнейшем могут появиться новые усовершенствованные методы.

На части площадей, для которых необходимо составление карт, геохимические съемки уже проведены. Однако данные этих съемок были обработаны вручную и, следовательно, с указанными выше недостатками. Чтобы извлечь из них дополнительную информацию, которая по объему может

превысить полученную ранее, необходимо повторить их обработку новыми методами с построением карт на ЭВМ. Эта работа может быть выставлена в качестве самостоятельной задачи, имеющей большое значение. Количество данных, накопившихся в результате проведения работ по геохимическим методам поисков, характеризуется тем, что отобрано около 150 млн. проб по стране и миллионы — по отдельным регионам.

Обработка этого громадного материала на новом качественном уровне может привести к выявлению большого числа площадей дополнительно к тем, которые были установлены при первоначальной обработке. Важна также систематизация данных по особенностям пространственного расположения месторождений, которая будет при этом получена. Мелкомасштабные карты могут быть составлены путем выборки части данных из материалов старых съемок.

Эта работа связана с рядом трудностей, которые предстоит преодолеть. Основная из них заключается в том, что материалы разнородны по содержанию и качеству, и отражение их на единой карте требует специальных подходов. Разнородность обусловлена тем, что на разных площадях определялось разное количество элементов, пробы анализировались в разное время и в различных лабораториях, вследствие чего между данными анализа есть систематические расхождения и, наконец, различным было качество самого геохимического опробования.

Составление геохимических карт больших территорий требует наведения порядка в эталонном хозяйстве. Необходимо изготовление государственных стандартов различных природных материалов, опробуемых при геохимических съемках.

Во-вторых, необходимо подчеркнуть некоторые особенности интерпретации результатов геохимических съемок. Для объяснения той картины, которая изображается на геохимических картах, привлекается вся сумма геологических и геофизических данных. Важны для этого и сведения о распределении изображаемых элементов в коренных горных породах. Например, ярко выраженные аномалии целого ряда элементов, таких как олово, вольфрам, литий, фтор и другие, могут быть связаны не с рудными месторождениями, а с повышенными, но рассеянными концентрациями их в комплексах магматических пород или определенных их фациях и фазах. Аномалии других элементов возникают в связи с наличием повышенных концентраций в горизонтах осадочных или метаморфических пород.

Можно лишь отметить, что хотя за той или иной аномалией может и не стоять месторождение, наличие повышенных концентраций рудообразующих элементов, выражающееся либо в множестве аномалий, либо в общем повышении фона, представляет собой признак, благоприятный для оценки рудоносности районов. Для многих рудных районов имеются данные, свидетельствующие о преемственной связи между наличием месторождений и существованием повышенных концентраций характерных для них элементов в горных породах, причем связь нередко распространяется и на дорудные, и на пострудные породы. Это обстоятельство облегчает обнаружение рудных районов, потому что вследствие повышенных содержаний элементов в породах весь район может выглядеть как одна большая аномалия.

В некоторых случаях связь аномалий с источником того или иного характера не очевидна, и тогда целесообразно организовать специальные работы по изучению распределения элементов в коренных горных породах или некоторых их типах. Например, именно на этом этапе, после выполнения региональных геохимических съемок, следует проводить изучение магматических комплексов с точки зрения их потенциальной рудоносности. Размещение геохимических аномалий само по себе весьма важно для целенаправленного проведения этого изучения. Могут быть взяты определенные массивы, характеризующиеся наличием аномалий, а с другой сто-

роны, будет привлечено внимание к случаям, когда такие же массивы не сопровождаются аномалиями. Становится более ясным перечень элементов, на которые нужно проводить анализ при геохимическом изучении и т. п.

В данных геохимических съемок отражаются не только месторождения, но и характерные особенности пород по содержанию редких и рассеянных элементов. Это имеет место и в случае съемок по потокам рассеяния. Даже небольших различий содержаний элементов в разных горных породах или изменений их по простиранию и мощности пород достаточно для того, чтобы они нашли отражение в потоках рассеяния. Это связано с тем, что тела горных пород, как правило, гораздо крупнее, чем тела месторождений, и поставляют в реки большее количество материала.

При интерпретации данных геохимических съемок, кроме выделения явных аномалий, необходимо обращать внимание на изменение содержаний элементов и других показателей в пределах фона. Изучение этих особенностей может дать много сведений. Наиболее очевидная цель такого изучения — выяснение характерных или примечательных содержаний элементов в горных породах, расчленение и корреляция толщ и т. д.

Особенность мелкомасштабных геохимических карт, составляемых для больших территорий на основе опробования с малой плотностью или путем выборки данных из результатов более подробных съемок, выражена в том, что на них исчезают детали, но зато более ярко выглядят главные закономерности распределения элементов. Это и составляет их важнейшее достоинство и обуславливает необходимость их изготовления. Путем составления мелкомасштабных карт можно добиться обнаружения таких закономерностей, которые на крупномасштабных картах остаются не замеченными. В этом отношении может быть проведена аналогия с космическими фотографическими снимками — важнейшие геологические структуры, видные из космоса, не заметны на снимках с низколетающих самолетов.

На мелкомасштабных геохимических картах может отчетливо обозначаться связь аномалий и их цепочек с глубинными разломами и другими важнейшими геологическими структурами. Представляет интерес привлечение для интерпретации космогеологических данных. На закрытых площадях, где геохимические аномалии могут быть очень слабыми, для их интерпретации имеет значение обнаружение посредством космических снимков просвечивающих сквозь рыхлые отложения глубинных структур.

Общее значение геохимического изучения больших территорий характеризуется следующим. С одной стороны, оно представляет собой практически очень ценный прием, позволяющий быстро выбирать районы сосредоточения поисковых работ. Их результаты важны для текущего и долгосрочного планирования геологоразведочных работ в государственном и региональном масштабах. С другой стороны, использование этих результатов может много дать для познания закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых, что является важнейшей задачей геологических наук.

*Институт геохимии им. академика А. П. Виноградова
СО АН СССР, г. Иркутск*

А. И. ПЕРЕЛЬМАН

ЭНЕРГИЯ И ИНТЕНСИВНОСТЬ РУДООБРАЗОВАНИЯ

В числе достижений теоретической геохимии последнего десятилетия видное место занимает разработка вопроса об энергии рудообразования, которой наука обязана Н. И. Сафронову. Особенно ценно, что в этих ис-

следованиях сложные теоретические проблемы тесно увязаны с практикой прикладной геохимии, поисками полезных ископаемых [Сафронов и др., 1978].

Напомним, что основанием для расчета энергии рудообразования послужила идеализированная термодинамическая модель, согласно которой концентрация рудных элементов происходит по закону идеальных газов из рассеянного состояния в результате сжатия «атмосферы» газа. В качестве исходного состояния принимается гранитоидная магма. Это позволило вывести следующую формулу [Сафронов, 1966]:

$$E = K \cdot \ln K, \quad (1)$$

где E — энергия рудообразования данного элемента, рассчитанная на единицу объема, K — кларк концентрации элемента в руде (относительно гранитоидов). Хотя предпосылки этих построений достаточно условны (термодинамика идеальных газов, гранитоиды как источник металлов и т. д.), полученные выводы хорошо согласуются с экспериментальными данными. Расчеты энергии рудообразования позволили установить математические закономерности, связывающие запасы руд металлов с их содержанием в рудах и на этой основе оценивать перспективы рудоносности отдельных территорий. Данные построения применимы и для анализа ореолообразования.

В формулу Н. И. Сафронова входит логарифм кларка концентрации. Эта величина имеет важное значение не только для расчета энергии рудообразования, но, как будет показано ниже, и для расчета интенсивности рудообразования.

Энергию рудообразования, как и всякую работу, очевидно можно изобразить через произведение экстенсивных и интенсивных параметров. В этой статье мы сосредоточим внимание на интенсивности рудообразования и ореолообразования, которая может быть выражена с помощью уравнения, выведенного автором в 1940 г. [Перельман, 1940, 1956, 1968 и др.].

Допустим, что в изучаемой природной системе (например, гранитоидной магме) количество атомов элемента X измеряется величиной « b », причем за промежуток времени dt мигрировало db атомов. Очевидно, скорость миграции будет определяться величиной db/dt . Однако данная величина еще не характеризует интенсивность миграции, так как не учитывает общей массы атомов элемента X в системе (b). Если разделить скорость миграции на величину « b », то и получится интенсивность миграции элемента X в данной системе, которую мы обозначаем символом P_X .

$$P_X = \frac{1}{b_X} \cdot \frac{db_X}{dt}. \quad (2)$$

Величину $\frac{db_X}{b_X}$ можно рассматривать как самостоятельную бесконечно малую величину и обозначить dU . Тогда формула интенсивности миграции приобретает более простой вид:

$$P_X = \frac{dU}{dt}. \quad (3)$$

Отсюда получаем $dU = P_X \cdot dt$, т. е. dU представляет собой произведение интенсивности миграции на бесконечный малый промежуток времени dt , в течение которого интенсивность миграции сохраняет значение P_X . dU можно назвать элементарным импульсом миграции, а интегральную величину U — импульсом миграции. Он представляет собой сумму элементарных импульсов миграции за промежуток времени $t_2 - t_1$:

$$U_X = \int_{t_1}^{t_2} P_X \cdot dt. \quad (4)$$

Для определения значения U необходимо знать зависимость интенсивности миграции P_X от времени, которая в большинстве случаев неизвестна. Однако если принять, что в изучаемом процессе интенсивность миграции элемента X постоянна, то уравнение интегрируется:

$$U_X = P_X(t_2 - t_1). \quad (5)$$

Если принять $t_1 = 0$, то получаем простую формулу: $P_X = \frac{U}{t}$. Напомним, что $dU = \frac{db}{b}$, откуда

$$U = \int_{b_1}^{b_2} \frac{db}{b} = \ln \frac{b_2}{b_1}, \quad (6)$$

где b_2 — содержание элемента X в руде (ореоле), а b_1 — в исходной системе (гранитоидах и т. д.). Очевидно, что в случае рудообразования $\frac{b_2}{b_1}$ будет представлять собой кларк концентрации элемента X в руде, величину K в формуле Сафронова (1). Поэтому для рудообразования импульс миграции равен натуральному логарифму кларка концентрации, а интенсивность миграции (рудообразования) логарифму кларка концентрации, деленному на время рудообразования:

$$P_X = \frac{U}{t} = \frac{\ln K}{t}. \quad (7)$$

Кларки концентрации элементов в рудах хорошо известны, например, для ртутных руд они достигают 900 000, для медных — 400, для скандиевых — 10, железных — 7, магниевых — 4,6 и т. д. Это дает величины $U(\ln K)$ для ртути — 13,7, меди — 5,98, скандия — 2,3, железа — 1,9, магния — 1. Таким образом, импульс миграции в связи с тем, что кларк концентрации входит в формулу (7) под знаком логарифма, меняется сравнительно слабо — в пределах одного порядка (хотя кларки концентрации элементов в рудах колеблются в сотни тысяч раз).

Если принять условно, что рудообразование продолжалось в течение 1 млн. лет, то интенсивность рудообразования для ртути составит $1,37 \cdot 10^{-5}$, для меди $5,98 \cdot 10^{-6}$, для скандия $2,3 \cdot 10^{-6}$ и т. д. Это означает, что на каждый грамм металла, содержащийся в данном объеме руды, ежегодно в процессе рудообразования добавлялось $1,37 \cdot 10^{-5}$ г ртути, $5,98 \cdot 10^{-6}$ г меди и $2,3 \cdot 10^{-6}$ г скандия. Конечно, это только пример порядка величин, так как неизвестно истинное время рудообразования. Не следует также забывать, что все построения исходят из постоянства интенсивности миграции.

Из формулы (7) следует, что интенсивность рудообразования в основном зависит от времени рудообразования, так как кларк концентрации входит под знаком логарифма и изменяется слабо. Преобразуя формулу (7), можно в явной форме выразить зависимость кларка концентрации элемента в руде от интенсивности рудообразования и времени:

$$\ln K = P_X \cdot t, \quad K = e^{P_X \cdot t}. \quad (8)$$

Таким образом, кларк концентрации элемента в руде является экспоненциальной функцией от интенсивности рудообразования и времени. Из формул (1) и (7) выводится связь энергии рудообразования и интенсивности рудообразования:

$$E = K \cdot P_X \cdot t. \quad (9)$$

Следовательно, энергия рудообразования для данного элемента равна произведению кларка концентрации его в рудах на интенсивность и время рудообразования.

Приведенные выше построения можно распространить на вторичное ореолообразование и выветривание. В этом случае $b_2 < b_1$ и, следовательно, P_X и U будут характеризоваться отрицательными величинами. Для ореолообразования в качестве величины b_1 следует принять содержание элемента X в руде, а в качестве b_2 — в ореоле. При изучении коры выветривания b_1 равно содержанию элемента X в неизменной породе, а b_2 — в образовавшихся из нее продуктах выветривания (b_2 не равно процентному содержанию элемента X в продуктах выветривания и определяется на основе особого пересчета с использованием понятия об элементе-свидетеле [Перельман, 1940]). Таким образом, при изучении ореолообразования, процессов выветривания и т. д. член K в формуле (7) представляет собой уже не кларк концентрации, а коэффициент концентрации — отношение содержаний элемента X в исходной и производной системах.

Итак, понятие об энергии рудообразования может быть увязано с интенсивностью рудообразования. Это еще более подчеркивает фундаментальное значение построений Н. И. Сафронова, их значение не только для теории геохимических поисков, но и для решения других теоретических и прикладных проблем геохимии. Дальнейшие исследования в данном направлении представляются весьма перспективными.

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии АН СССР, г. Москва*

Е. М. КВЯТКОВСКИЙ, Г. Ф. НОВИКОВ, В. А. АРЦЫБАШЕВ

КЛАССИФИКАЦИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Основная цель геологической службы — обеспечение народного хозяйства запасами минерального сырья. Геолого-поисковые и разведочные работы, направленные на выявление месторождений полезных ископаемых, ведутся различными методами и эффективность этих работ зависит от рационального сочетания различных методов в той или иной обстановке. В настоящее время практически общепринято деление всех поисково-разведочных методов (по В. И. Красникову) на 4 класса: геологические, геофизические, геохимические и технические методы. В общем такое деление достаточно очевидно, однако отнесение того или иного конкретного метода к тому или иному классу не всегда может быть бесспорным. Особенно это относится к классам геофизических и геохимических методов, что в значительной мере объясняется историей развития этих методов. Как известно, инициаторами разработки геохимических методов поисков рудных месторождений были геофизики ЦНИГРИ (ныне ВСЕГЕИ) Н. И. Сафронов, А. П. Соловов, Е. А. Сергеев и др. В то время эти методы именовались «физико-химическими» и входили в комплекс геофизических, наряду с радиоактивными, как методы прямых поисков рудных месторождений или методы разбраковки геофизических (магнитных, электрических, гравитационных) аномалий. Затем «физико-химические» методы, включающие стадию отбора, обработки и лабораторного анализа проб, стали именоваться «металлометрическими» в отличие от радиоактивных и ядерно-физических, позволяющих определять содержание химических элементов непосредственно в поле на точке наблюдения. Ныне действующая классификация геохимических методов поисков, предложенная В. И. Красниковым в 1959 г., по существу, сохранила этот принцип, но он нуждается в пере-

На наш взгляд, в основу деления поисково-разведочных методов на геофизические и геохимические должен быть положен более существенный признак, а именно, предмет исследования. Предмет исследования геохимических методов — геохимическое поле и его аномалии, в частном случае приобретающие смысл промышленных месторождений. Под *геохимическим полем* понимается геологическое пространство, характеризующееся в каждой физической точке определенными содержаниями химических элементов. Предмет исследования геофизических методов — геофизическое поле и его аномалии, в частном случае обусловленные месторождениями полезных ископаемых. Под *геофизическим полем* понимается геологическое пространство, характеризующееся в каждой точке определенными значениями того или иного физического поля.

В основу теории геохимических методов поисков и разведки положены закономерности распределения и миграции, концентрации и рассеяния химических элементов в земной коре. В основу теории геофизических методов положены закономерности геофизических полей в пространстве и времени, обусловленные геологическим строением земной коры и физическими свойствами пород и руд.

Естественно, что абсолютно четко границ между классами геофизических и геохимических методов не существует, тем более, что с течением времени определение содержаний химических элементов все более эффективно осуществляется физическими методами. Отсюда следует, что критерием отнесения того или иного метода к классу геохимических является его способность изучать геохимическое поле, т. е. прямым образом отвечать на вопрос, каковы содержания тех или иных химических элементов в изучаемом пространстве. С этой точки зрения некоторые методы электро-разведки, позволяющие оценивать вещественный состав рудных тел (метод КСПК, ВП), в принципе могут быть отнесены к геохимическим, что в какой-то мере отражается в их отнесении к подклассу *электрохимических методов*.

Основываясь на вышеизложенном, перейдем к рассмотрению классификации геохимических методов поисков. По предложению В. И. Красникова, сейчас общепринято деление всех геохимических методов на 4 группы по фазовому состоянию вещества в изучаемом геохимическом поле земной коры: лито-, гидро-, атмо- и биохимические методы. Геохимическое поле может изучаться в пределах земного, водного и воздушного пространства земной коры, причем во всех случаях, согласно закону Кларка — Вернадского, в любой точке пространства присутствуют все химические элементы и, добавим, во всех четырех фазовых состояниях. Естественно, что речь здесь идет о макрообъемах земной коры и под *точкой* понимается объем от кубических сантиметров в гидро- и литосфере до многих десятков и сотен кубических метров в атмосфере. На фоне нормального геохимического поля будут наблюдаться геохимические аномалии, некоторые из которых могут оказаться рудными, т. е. быть объектом поисков. В зависимости от генетического типа ожидаемой геохимической аномалии будут применяться различные геохимические методы поисков. Коль скоро речь идет о поисках рудных месторождений, все рудные геохимические аномалии могут быть объединены в 4 типа: аномалии первичного рассеяния, первичные ореолы, вторичные ореолы и потоки рассеяния.

До последнего времени воздушные (аэро) и водные (аква) геохимические методы играли весьма небольшую роль, и основные объемы выполнялись земными (терри) литохимическими методами, главным образом ориентированными на выявление вторичных ореолов рассеяния. В слабоизученных районах при мелкомасштабных поисках существенную роль играют террилитохимические и терригидрохимические методы поисков по потокам рассеяния и в меньшей мере террилитохимические методы исследования аномального первичного рассеяния элементов. При поисках рудных тел на флангах рудного поля и на глубоких горизонтах весьма эф-

фактивно используется террилитохимический метод поисков по первичным ореолам. В особой ландшафтно-геохимической обстановке успешно применяются терриатмо- и террибиохимические методы поисков по вторичным ореолам рассеяния.

Аквагеохимические методы найдут широкое применение при исследовании морей и озер, причем можно говорить об использовании всех четырех методов (аквалито-, гидро-, атмо- и биохимического), ориентированных на выявление вторичных ореолов и потоков рассеяния рудных месторождений, расположенных на дне. При опробовании донных осадков озер и морей (аквалитохимический метод) можно вести поиски современных осадочных месторождений по их первичным ореолам. В принципе можно говорить об аквагидрохимических методах поисков рудных месторождений типа рассолов во впадинах Красного моря по их первичным ореолам.

Аэрогеохимические методы поисков в вариантах лито-, атмо- и биохимических применяются, судя по опубликованным данным, фирмой Баринжера за рубежом, и в опытном порядке аналогичные методы опробуются у нас в Союзе. Ориентированы эти методы на поиски рудных месторождений по потокам рассеяния рудных месторождений в атмосфере в виде взвешенных пылевидных частиц, аэрозолей органического происхождения (продуктов «дыхания» растений) и свободных газов (ртуть, радон).

В обобщенном виде классификация геохимических методов поисков и разведки рудных месторождений представлена на рис. 1. Толщиной стрелки условно показана значимость метода внутри каждого подкласса и между подклассами.

Геохимические поиски тем или иным методом (см. рис. 1) осуществляются путем проведения планомерных исследований того или иного участка геохимического поля земной коры. Такого рода исследования принято именовать геохимической съемкой, принципы проведения которой во многом сходны с геофизической и геологической съемками. Прежде всего в зависимости от поставленной задачи геохимическая съемка может проводиться в самом различном масштабе, на любой стадии геологоразведочных работ, начиная от рекогносцировочных исследований масштаба 1 : 500 000 и мельче и кончая разведочно-эксплуатационными работами масштаба 1 : 500 и крупнее. Естественно, что в зависимости от детальности исследования, а также конкретной обстановки района поисков и применяемого метода поисков густота и положение точек (линий, площадок, объемов) определения содержания химических элементов в геохими-

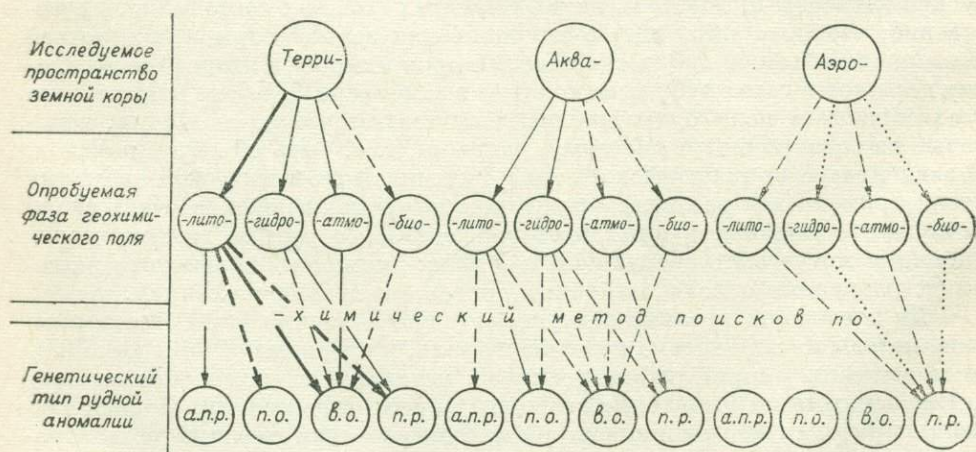


Рис. 1. Классификация геохимических методов поисков рудных месторождений. Сокращения на схеме: а. п. р. — аномальное первичное рассеяние; п. о. — первичный ореол; в. о. — вторичный ореол рассеяния; п. р. — первичное рассеяние. Толщиной стрелки (сплошная, пунктирная, точечная) условно показана значимость метода.

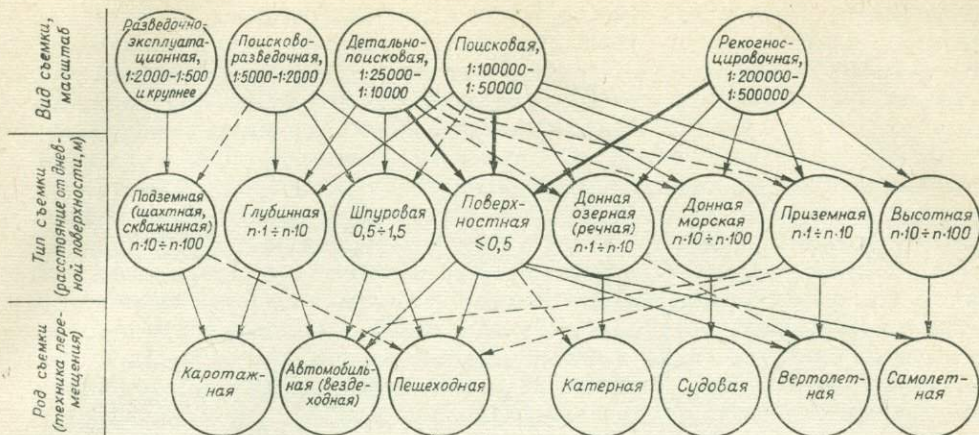


Рис. 2. Классификация геохимических съемок при поисках рудных месторождений.

чекое поле может быть самой различной, как и техника перемещения в процессе геохимической съемки. При всем многообразии возможных сочетаний различных условий проведения геохимических съемок можно все же в основу классификации съемок различного типа положить три основных признака: детальность работ (определяется решаемыми задачами), расстояние плоскости (объема) изучения геохимического поля от дневной поверхности, техника перемещения в процессе съемки. На рис. 2 приведен один из возможных вариантов классификаций геохимических съемок. В принципе подземная, глубинная, шпуровая и поверхностные съемки выполняются терригеохимическими методами, донная, озерная и морская — аквагеохимическими, приземная и высотная — аэрогеохимическими. При этом по мере уменьшения детальности исследований возрастает их комплексность. Так, разведочно-эксплуатационная съемка проводится, как правило, лишь террилитохимическим методом по первичным ореолам, тогда как рекогносцировочная съемка 1 : 500 000 масштаба на материках, охватывающая многие десятки и сотни тысяч квадратных километров, осуществляется широким комплексом терри- и аэрогеохимических методов поисков в варианте поверхностной автомобильной, пешеходной, катерной, вертолетной и самолетной террило-, гидро-, био- и атмосферическими методами, а также высотной самолетной (или приземной вертолетной), аэроатмо- и аэролитохимическими методами в зависимости от условий поисков на той или иной площади.

Определение содержания химических элементов в заданных точках (линиях, площадках, объемах) геохимического поля при проведении геохимических съемок различными методами может осуществляться различными способами — с отбором проб и последующим их анализом в лаборатории или оперативно, на месте опробования, и без отбора проб с определением содержания элементов непосредственно на точке наблюдения или дистанционным определением содержания элементов на площади или в объеме, отстоящем от точки наблюдения на многие десятки или первые сотни метров (рис. 3).

При опробовании геохимического поля с отбором проб определение элементов в пробах может осуществляться практически любым лабораторным методом анализа — химическим, ядерно-физическим, радиометрическим и т. д., отвечающим основным требованиям, предъявляемым к анализу при геохимических исследованиях, — по порогу чувствительности, точности, комплексности, оперативности, производительности и стоимости. Такого рода опробование целесообразно именовать «металлометрическим», сохранив этот ранее использовавшийся термин в несколько ином

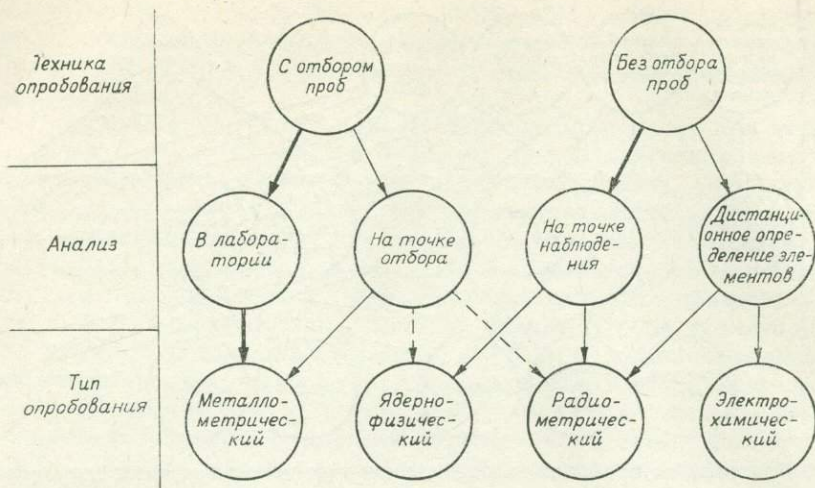


Рис. 3. Классификация способов отбора проб геохимического поля при геохимических поисках рудных месторождений.

содержании. Естественно, что многообразие методов анализа и способов отбора проб, применяемых при «металлометрическом» отборе проб в различном фазовом состоянии вещества, позволяет подразделить этот тип отбора проб на несколько подтипов по тому или иному признаку, каждый из которых, в свою очередь, мог бы быть разделен на группы и подгруппы. Так, например, можно было бы выделить подтип валового и фазового отбора проб, валовое отбор проб можно было бы подразделить на моно- и полиэлементное и т. д. отбор проб, а фазовое, например, на шликтогеохимическое, МФ-отбор проб (метод подвижных форм) и т. д.

Металлометрическое отбор проб предполагает выполнение анализов отобранных проб в лаборатории (стационарной или полевой), хотя в принципе можно было бы многие методы анализа применять в определенном полевом варианте с определением содержаний на точке отбора проб. Известно, что существует полевые гидрохимические лаборатории, позволяющие проводить определение содержаний в гидрохимических пробах непосредственно на точке их отбора целого ряда макро- и микрокомпонентов. На многие элементы известны экспрессные микрохимические методы анализа, позволяющие проводить определение элементов в литохимических пробах на точке отбора. Известны примеры использования ядерно-физического (рентгенорадиометрического) метода анализа проб на сумму халькофильных металлов непосредственно на точке отбора. Широко применяемая эманационная съемка, по принятой классификации относящаяся к шпуровой пешеходной съемке атмосферическим методом поисков по вторичным ореолам рассеяния радиоактивных газов, базируется на радиометрическом анализе атмосферических проб непосредственно в процессе их отбора в полевых условиях.

При отборе проб геохимического поля без отбора проб определение содержаний на точке наблюдения может осуществляться различными ядерно-физическими и радиометрическими полевыми методами анализа при террилитохимических съемках, атомно-абсорбционными методами — при аэроатмосферических съемках (такой метод разработан в ЛГУ на определение ртути в приземном слое атмосферы, и в принципе аналогичным способом можно определять в атмосфере многие элементы), физико-химическими методами — при гидрохимических съемках (в принципе уже существуют способы определения содержания ряда элементов в воде с помощью специальных электродов).

Особый тип опробования, в какой-то мере стоящий на грани между геофизическими и геохимическими методами, — дистанционное определение химических элементов, что возможно только при использовании естественных или искусственно создаваемых физических полей, прямым образом отражающих состав геохимического поля. К числу таких методов относятся, в первую очередь, самолетные и вертолетные гамма-спектральные съемки, нацеленные на изучение распределения радиоактивных элементов на поверхности Земли по характеру гамма-поля на расстоянии в несколько десятков или первых сотен метров от поверхности Земли. Отчасти к таким методам относятся электрохимические методы (КСПК, ВП), с помощью которых в принципе может определяться элементный состав объекта исследования. В более общем плане прямые геофизические методы, коль скоро они решают в конечном счете задачу изучения геохимического поля, могут быть отнесены и к геохимическим методам поисков, и к геофизическим методам, поскольку эта задача решается посредством изучения геофизического поля.

Хотя сущность различных геохимических методов поисков не меняется при переходе от металлометрического опробования к ядерно-физическим или другим методам опробования геохимического поля без отбора проб, однако резко меняется при этом весь процесс выполнения геохимических съемок, приближая их по многим показателям к процессу геофизических. Это в какой-то мере объясняет правомерность именования геохимических методов поисков по самому способу опробования, тем более, что это сокращает, делает более лаконичным их название. Ниже приведены некоторые примеры сокращенного и более полного наименования отдельных методов:

1	2
Трековый метод	Атмохимический метод с металлометрическим (трековым) опробованием
Шлихогеохимический метод	Литохимический метод с металлометрическим (шлихогеохимическим) опробованием
Биогеохимический метод	Биогеохимический метод с металлометрическим опробованием водных мхов
Аэрозольный метод	Аэролитохимический метод с металлометрическим опробованием (аэрозолей)
Аэрогамма-спектрометрический метод	Террилитохимический метод с радиометрическим (гамма-спектральным) дистанционным опробованием
Фторометрический нейтрон-активационный метод	Литохимический метод с ядерно-физическим (нейтрон-активационным) опробованием на фтор
Уранометрический метод	Литохимический метод с металлометрическим (перволюминесцентным) опробованием на уран
Спектрозолотометрический метод	Литохимический метод с металлометрическим (спектрохимическим) опробованием на золото

Перспективы дальнейшего развития, все более широкого внедрения в практику и повышение эффективности геохимических методов при поисках, разведке и эксплуатации рудных месторождений, как нам представляется, лежат на пути все более широкого использования на практике ядерно-физических и других методов опробования, не требующих предварительного отбора проб. Это позволит значительно быстрее перейти к автоматизированным системам обработки геохимической информации, что резко повысит оперативность и эффективность геохимических работ.

Наиболее интенсивно в ближайшее время должны развиваться аэро- и аквагеохимические, а также терриатмохимические методы, поскольку перед геологической службой стоят задачи исследования шельфа, изучение закономерностей размещения рудных месторождений в земной коре с использованием высотных, в том числе космических съемок, поиски глубокозалегающих месторождений в старых рудных районах.

Существенное внимание должно быть уделено дальнейшему развитию теории геохимических методов поисков и в первую очередь количественной оценке многочисленных геохимических аномалий с подсчетом прогнозных запасов по данным геохимических съемок любой детальности. Это относится и к разведочно-эксплуатационным работам, где роль геохимических методов опробования еще далеко не достаточна, хотя внедрение их в должном объеме дает весьма ощутимый экономический эффект.

В целом можно отметить, что в области дальнейшего производственного применения геохимических методов при поисках, разведке и эксплуатации рудных месторождений, развития их теоретических основ, а также совершенствования методики и техники еще существуют огромные нерешенные возможности. Быстрейшее и квалифицированное решение этих задач требует ежегодной подготовки в вузах достаточного количества инженеров-геохимиков с достаточно широкой профессиональной подготовкой в области геохимических методов поисков, разведки и эксплуатации рудных, нерудных, нефтяных, газовых и прочих типов месторождений полезных ископаемых.

*Горный институт им. Г. В. Плеханова,
г. Ленинград*

А. Н. ЕРЕМЕЕВ, А. С. КЛОЧКОВ

ПРИНЦИПЫ И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ГЛУБИННЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Глубинные геохимические поиски проводят главным образом в определенных рудных областях, и направлены они прежде всего на выявление аналогов известных в районе промышленных типов месторождений. При выполнении глубинных поисков выявляют большое число литохимических аномалий, оценка которых в методическом и техническом отношении представляет большие трудности.

Как известно, глубинные геохимические аномалии могут быть обусловлены различными причинами: неравномерностью распределения химических элементов в породах («породные» аномалии), накоплением элементов на геохимических барьерах в зоне гипергенеза (вторичные аккумуляции), разнотипными, в том числе промышленными, скоплениями рудных элементов в породах складчатого фундамента и перекрывающих рыхлых образованиях (первичные ореолы, вторичные остаточные и наложенные ореолы рассеяния).

Определить перспективность и дать надежную оценку глубинных аномалий значительно сложнее, чем поверхностных. Эти обстоятельства определяют особенности методики их оценки. Основной принцип оценки состоит в последовательном движении по восходящему ряду: геохимическая аномалия — вторичный наложенный или остаточный ореол рассеяния — первичный геохимический ореол — проявление рудной минерализации — рудопроявление — месторождение. Вплоть до проявления минерализации члены этого ряда различаются между собой качественно, далее количественно. В связи с этим различают и в процессе оценочных ра-

бот используют две группы оценочных признаков, одна из которых связана с определением геолого-генетической (классификационной) принадлежности геохимических аномалий (качественная сторона оценки), а другая — с определением практической значимости перспективных проявлений минерализации и рудопроявлений, т. е. выявлением их связи с промышленным месторождением (количественная сторона).

В соответствии с принципом восходящего движения оценочные работы можно разбить на 3 последовательно выполняемых этапа: оценку геохимических аномалий; оценку ореолов и проявлений рудной минерализации; оценку рудопроявлений.

Целенаправленная оценка геохимических аномалий основана на представлениях о существующих и возможных в районе типах концентраций рудных элементов и их отличительных особенностях. Недостаточно обоснованная типизация аномалий может привести к вовлечению в дальнейшую оценку неперспективных аномалий или, что еще хуже, к необоснованному выводу о неперспективности аномалий, на самом деле заслуживающих дальнейшего изучения. Для конкретных рудных районов оценочные признаки основных типов геохимических аномалий обычно известны. Удобной формой систематизации оценочных признаков являются порайонные классификации геохимических аномалий, составленные с позиции разделения всего их разнообразия на однородные по генезису перспективные проявления. Такая классификация [Еремеев и др., 1976] предусматривает разделение геохимических аномалий на классы, группы, типы и тем самым намечает рациональную последовательность их оценки на основе выявления типоморфных признаков от более общих к частным. Принадлежность к классу определяется средой развития аномалии, к группе — ее геолого-генетической природой, к типу — характером предрудного эндогенного процесса и минералого-геохимическими признаками рудной стадии. Опыт показывает, что подобного рода классификации — надежная основа для разбраковки глубинных геохимических аномалий на стадии поисковых работ и выделения для последующей оценки прежде всего тех типов аномалий, с которыми в районе связаны промышленные месторождения, создающие основу горнодобывающей промышленности.

Первичная оценка с целью определения генетической принадлежности аномалии выполняется сразу после ее выявления. Весьма важно, чтобы на самой начальной стадии, когда на участке еще ведутся полевые работы, по аномалии был бы собран необходимый геологический материал, достаточно объективный для решения вопросов, связанных с ее качественной оценкой.

В первую очередь при оценке глубинной литохимической аномалии определяют среду, к которой она приурочена. В зависимости от положения в разрезе возможны три случая: аномалия расположена в осадочном покрове (класс I), в коре выветривания (класс II) или в породах складчатого фундамента (класс III). В пределах каждого класса оценочные работы направлены на установление принадлежности выявленных аномалий к наиболее перспективным группам.

На первом этапе оценку аномалий проводят непосредственно на поисковом профиле или серии детализационных профилей с помощью бурения мелких скважин. Изучение аномалий в осадочном чехле (класс I) начинают с установления ее пространственного положения в разрезе, выявления литолого-фациальной приуроченности и формы нахождения аномальных концентраций. Последнюю устанавливают путем минералогического изучения шлихов и различных по крупности фракций геохимических проб. Это дает возможность надежно разделить аномалии на две основные группы: сингенетические аккумуляции (I-A) и вторичные аккумуляции (I-B). К группе сингенетических аккумуляций относят рудные концентрации, приуроченные к аллювиальным пескам и другим грубообломочным фациям и представленные в виде россыпей или рассеянной минерализации, ус-

тойчивой в гипергенных условиях. Подобные проявления оценивают с позиции россыпных месторождений и при благоприятной геологической позиции учитывают как признак возможных в районе коренных месторождений, остальные аномалии этой группы отбраковывают как «породные». Вторичные аккумуляции изучают с точки зрения связи со вторичным наложенным ореолом рассеяния эндогенного оруденения. Для этого прежде всего исследуют морфологию аномалии в разрезе и устанавливают спектр основных и сопутствующих элементов. Наиболее простым для отождествления со вторичным наложенным ореолом является случай размещения аномалии в нижней части покровных рыхлых отложений, когда ее переход во вторичный остаточный ореол или оруденение легко проследить. Наиболее трудна оценка геохимических аномалий, выявляемых в приповерхностной зоне мощной толщи рыхлых отложений. Как показывают исследования последних лет [Антропова, 1975; Исследование и применение..., 1975], некоторые из них могут представлять собой оторванные наложенные ореолы глубокозалегающих рудных месторождений. Из-за сложности связей с глубокозалегающими рудами признаки отличия оторванных наложенных ореолов от вторичных аккумуляций, не связанных с эндогенным оруденением, до сих пор не разработаны. Вопрос этот сложный и требует специальных исследований.

Аномалии, для которых установлены признаки вторичных наложенных ореолов (I-B), изучают в направлении установления связи с разрывными структурами и оруденением в фундаменте, но в первую очередь со вторичными остаточными ореолами рассеяния в коре выветривания. Их дальнейшая оценка ведется уже на ином уровне.

Для разделения и оценки глубинных литохимических аномалий в коре выветривания (класс II) изучают их морфологию в разрезе, форму нахождения и спектр основных и сопутствующих рудных элементов, соотношение их концентраций в подвижной форме к общим содержаниям элементов, а также связь со структурами и концентрациями в фундаменте.

«Породные» аномалии (II-A) связаны с повышенным содержанием устойчивой аксессуарной или рассеянной рудной минерализации и сохранением очертания исходных геологических тел (например, даек). Аномалии, характеризующиеся гнездобразным сорбционным накоплением и отсутствием типичных для эндогенного оруденения сопутствующих элементов, относят к бесперспективной группе вторичных аккумуляций (II-B). Как вторичную аккумуляцию отбраковывают также и солевые безминеральные концентрации, не сопровождающиеся в породах фундамента признаками гидротермального процесса и оруденения (первичного ореола).

Основное внимание при оценке аномалий в коре выветривания уделяют установлению их возможной принадлежности к перспективному для дальнейшей оценки вторичному остаточному ореолу рассеяния рудной минерализации (II-B). Погребенный остаточный ореол опознают по грибовидной, расширяющейся в кровле коры форме, возрастанию концентраций с глубиной, наличию характерных сопутствующих элементов, отчетливому переходу центральной части ореола в нижележащие породы.

Оценку аномалий в породах складчатого фундамента (класс III) начинают с изучения их связи с тектоническими нарушениями и наложенными гидротермально-метасоматическими процессами. Возможны три основных случая. Аномалии в ненарушенных породах без гидротермально-метасоматических изменений, если только они не образуют крупных магматических скоплений ликвационного или другого типа, относят к бесперспективной группе «породных» аномалий. Аномальные концентрации легкоподвижных рудных элементов в трещинных зонах повышенной водопроницаемости без признаков гидротермально-метасоматических изменений вмещающих пород отбраковывают как вторичную аккумуляцию (III-Г).

Основной интерес представляют аномалии, приуроченные к гидротермально-проработанным зонам тектонических нарушений. Они, как правило, связаны с первичной рудной минерализацией или первичным ореолом (группа III-Б). Наличие такой связи устанавливают по данным минералого-геохимического изучения проб, протолок, шлифов. В случае глубокой проработки перспективной аномальной зоны гипергенными процессами признаки связи с первичным оруденением (ореолом) выявляют путем изучения ассоциаций основных и сопутствующих рудных элементов, скелетных структур первичной рудной минерализации и т. д. В большинстве случаев по этим признакам удается предварительно определить генетический тип проявления.

Окончательно вопрос о классификационной принадлежности решают после детального изучения характера гидротермально-метасоматического процесса, с которым связана гипогенная рудная минерализация, парагенезиса рудных и сопутствующих минералов и элементов. При этом внимание обращают не столько на отдельные минералогические признаки, которые в изолированном виде малоинформативны, сколько на установление всей совокупности признаков, характеризующих тип гидротермально-метасоматического процесса и рудной минерализации.

Таким образом, во всех трех классах оценка геохимических аномалий идет в направлении отбраковки «породных» концентраций и разного рода вторичных аккумуляций, не связанных с эндогенным оруденением, и выделения для дальнейшей оценки вторичных наложенных, остаточных и первичных ореолов промышленных и других перспективных типов месторождений.

В процессе оценочных работ воздерживаются от отбраковки геохимических аномалий, отождествление которых с бесперспективными группами и типами недостаточно обосновано фактическим материалом. В полной мере это относится к геохимическим аномалиям, признаки которых не совпадают с диагностическими признаками известных в районе проявлений. Подобные аномалии могут быть связаны с новыми, в том числе промышленно-перспективными, типами месторождений. Такие аномалии подвергают дополнительному изучению для обоснованного определения их классификационной принадлежности. Состав и общая последовательность оценки геохимических аномалий показана на схеме (см. рисунок).

Все последующие оценочные работы связаны с установлением практической значимости и оценкой возможных масштабов оруденения.

На втором этапе выполняют площадное изучение участков перспективных проявлений, выделенных для дальнейшей оценки. Для этого на участке проводят оконтуривание и детализацию бурением погребенных остаточных и первичных геохимических ореолов с установлением их эпицентров, изучают особенности геологического строения участка и рудоносных структур с выявлением их размеров и особенностей проявления гидротермальных процессов и оруденения, уточняют тип рудопроявлений. Изучение геологического строения участка и рудоносных структур выполняют с применением методов структурной геофизики. По результатам площадной детализации вторичных остаточных и первичных ореолов устанавливают их продуктивность и оценивают прогнозные запасы в недрах. Этим работ обычно бывает достаточно не только для перевода оцениваемого участка в разряд рудопроявления (за исключением слабоскрытых объектов, требующих глубокого бурения), но и выбора для оценки на глубину тех из них, с которыми, судя по параметрам и активности процесса, может быть связано промышленное по масштабам месторождение. Остальные объекты отбраковывают как мелкие или неперспективные по типу проявления.

На третьем этапе оценочных работ производят изучение перспективных рудопроявлений на глубину с целью выделения объектов, заслуживающих предварительной разведки. Учитывая сложность строения рудонос-

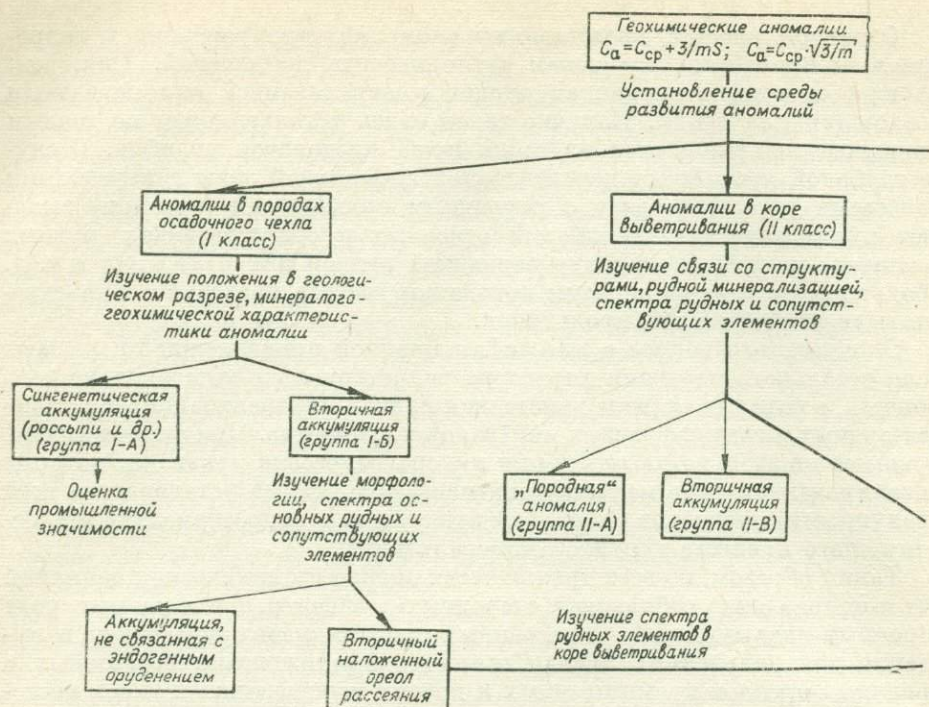
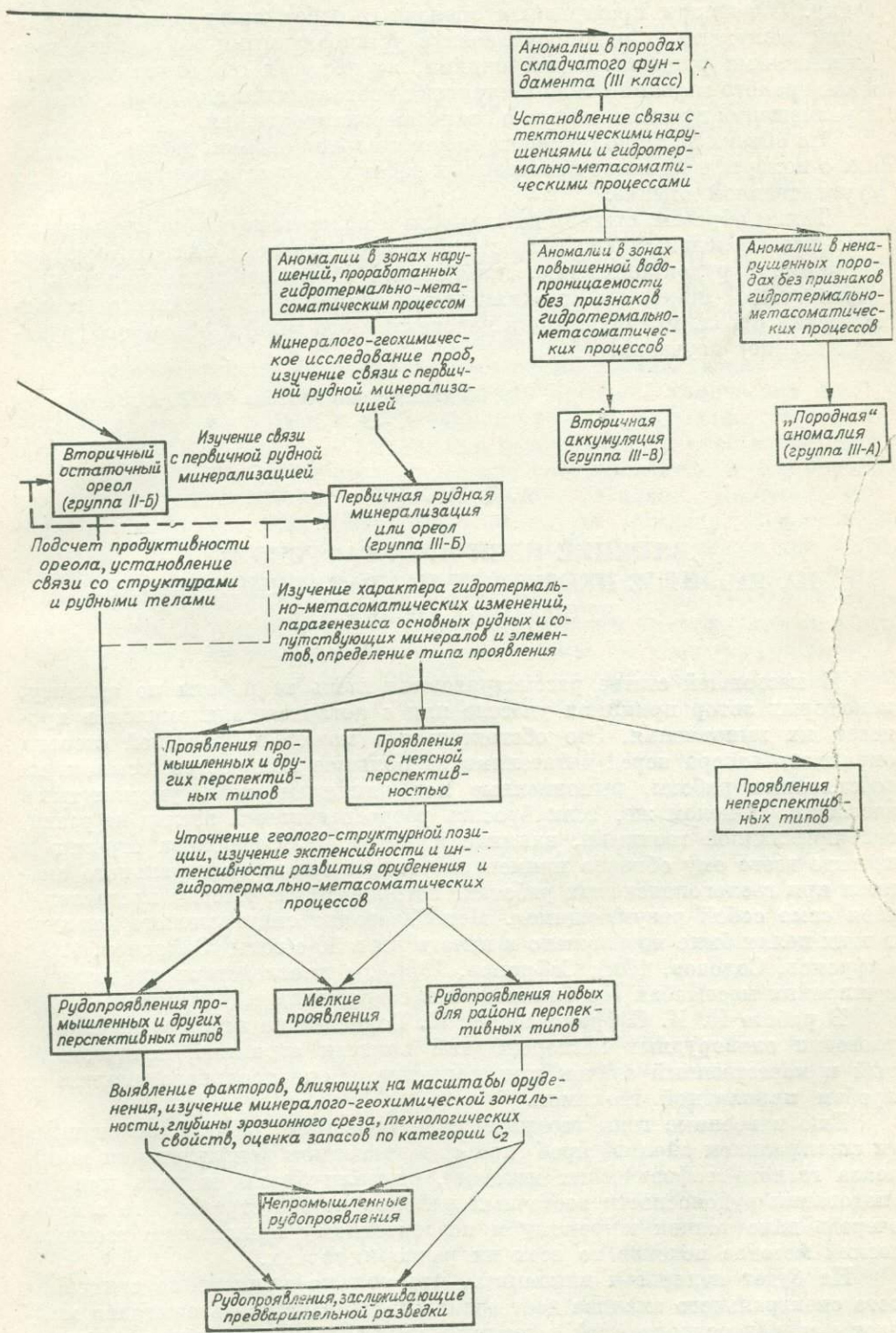


Схема оценки глубинных геохимических аномалий.

ных зон, недостаточность данных о положении в них оруденения, на глубину оценивают не отдельные тектонические швы, которые могут быть случайными и безрудными, а в целом структуру, контролирующую развитие гидротермально-метасоматического процесса и оруденения. Это особенно справедливо в случае слабозакрытого оруденения, когда проявленные на древнем денудационном срезе геохимические аномалии не обязательно строго увязываются с локальной структурой. В связи с этим оценку рудоносных зон и ореолов на глубину часто ведут с помощью разрезов из перекрытых наклонных скважин, обеспечивающих полное пересечение изучаемой рудовмещающей структуры. Глубина скважин зависит от степени эрозионного вскрытия объекта и вертикальной амплитуды развития промышленного оруденения.

Для изучения разрезов привлекают методы скважинной геофизики. Рудоносную структуру изучают на глубину с позиции особенностей ее внутреннего строения, параметров и пространственной взаимосвязи тектонитов, гидротермально-метасоматических изменений и оруденения, детального исследования вещественного состава первичных руд и зоны окисления, парагенезиса минералов и элементов, зональности в их распределении, изучения технологических свойств руд перспективных объектов. В результате не только определяют прогнозные запасы, но выявляют и частично окупают запасы категории C_2 .

Для некоторых рудных районов решена задача разделения (классификации) и распознавания объектов, существенно различающихся по масштабам оруденения, на основе комплекса геологических факторов. С помощью программ ЭВМ установлены оптимальные совокупности геолого-геохимических факторов, влияющие на масштабы оруденения ведущих промышленных типов [Математические методы..., 1977]. Получены практические решения, опирающиеся на использование легко выявляемых районов и локальных факторов, накапливаемых на ранних стадиях геолого-разведочных работ, и установлена очередность их вовлечения в детальные



работы. С помощью этих факторов дана прогнозная оценка многих участков. На ряде участков данные прогнозных оценок подтверждены последующими разведочными работами.

Конечным результатом поисково-оценочных работ является геолого-экономическое обоснование вовлечения объекта в предварительную разведку. С позиции проведенных оценочных работ предварительной разведки заслуживают рудопроявления с установленными на глубине промышленными рудными пересечениями, на которых геолого-структурная и минералого-геохимическая обстановка благоприятна для формирования и размещения промышленного по запасам месторождения.

По объектам, не получившим положительной оценки, дается заключение о полноте и качестве проведенных работ и обоснованные выводы об их отрицательной оценке.

Таким образом, степень детальности и полноты изучения аномальных объектов последовательно возрастает по мере перехода от геохимических аномалий к рудопроявлению. Аномальный объект последовательно проходит стадии линейного (геохимическая аномалия), площадного (геохимический ореол, минерализация перспективного типа) и объемного (рудопроявление) изучения.

Министерство геологии СССР, г. Москва

А. Д. МИЛЛЕР

ВЛИЯНИЕ ИДЕЙ Н. И. САФРОНОВА НА РАЗВИТИЕ НЕКОТОРЫХ НАПРАВЛЕНИЙ АНАЛИЗА ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

В настоящей статье рассматриваются лишь те работы по анализу, в которых автор принимал участие или с которыми знакомился в процессе их выполнения. Это обстоятельство может в известной степени оправдать автора перед читателями за большое количество ссылок на собственные работы, выполненные под влиянием идей, упомянутых в заглавии. В целом же, если бросить ретроспективный взгляд на развитие прикладной геохимии, влияние идей Н. И. Сафронова огромно и прежде всего ему обязано применение эмиссионного спектрального анализа при геологопоисковых работах, которое сейчас многим представляется само собой разумеющимся. Использование спектрального анализа в этих целях было предложено и начато им в 30-е годы [Сафронов, 1935; Сафронов, Соловов, 1935; Сафронов, 1936¹], а впоследствии продолжено в широких масштабах его ближайшими сотрудниками [Сафронов, 1962].

В работе Н. И. Сафронова и А. П. Соловова на примере поисков и разведки оловорудных месторождений показан огромный количественный и качественный скачок при применении спектрального анализа к пробам прикладной геохимии.

Еще в военные годы геохимические поисковые работы, основанные на спектральном анализе проб (при одновременном использовании комплекса геолого-геофизических методов), сыграли большую роль при исследовании рудоносности восточных районов нашей страны. Это в свою очередь дало толчок широкому и повсеместному применению геохимических методов поисков во всех их разновидностях.

Не будет излишним напомнить, что только применение эмиссионного спектрального анализа дает возможность выполнять ежегодно миллионы элементопределений в геохимических пробах. Разумеется, такое быстрое внедрение полуколичественного эмиссионного спектрального

метода в прикладную геохимию обусловлено удачным сочетанием его особенностей: высокой чувствительности, многокомпонентности, экспрессности и документальности.

Требование высокой чувствительности и в большинстве случаев многокомпонентности вытекает из сущности решения задач определения низких (порядка кларковых) концентраций типоморфных элементов. Четкая классификация двойственной природы рассеяния и выделение класса «эпигенетического или вторично-наложенного рассеяния» [Сафронов, 1936₂, 1957; Сафронов и др., 1936; Сафронов, Соловов, 1936] поставила перед аналитиками задачу отделения компонентов этой составляющей от тех же компонентов первично-конституционального рассеяния, которые всегда (в тех или иных пропорциях) присутствуют совместно с первыми. Следует отметить, что вопросы форм существования элементов, влияния окислительно-восстановительных условий и других термодинамических параметров весьма интересовали Н. И. Сафронова как в теоретическом, так и в практическом (для решения вопросов прикладной геохимии) плане, поэтому нельзя считать случайной его работу по восстановлению железа из пирротинов [Сафронов, 1944].

Решение задачи разделения компонентов составляющих рассеяния в зависимости от условий формирования ореолов, химических свойств типоморфных элементов и необходимой степени разделения достигается различными средствами — вытяжками разной степени «жесткости» [Миллер, 1962_{1,2}] или способности к комплексообразованию и растворению органического вещества, например водные [Миллер, Данилов, 1957; Болотникова, Миллер, 1969], слабокислотные [Миллер, Судов, 1963; Миллер, Степанов, 1959; Вострокнутов, 1972], комплексообразующие [Миллер и др., 1959], пирофосфатные [Антропова и др., 1970] или электродиализ и т. п. Однако это лишь часть решения. Вторая часть — концентрирование и определение — также достигается несколькими путями: соосаждением микроэлементов с коллоидом со спектральным (преимущественно) или фотометрическим окончанием и экстракционным концентрированием с фотометрическим (преимущественно) или спектральным окончанием.

⊕ Соосаждение микроэлементов (медь, цинк, свинец, олово, висмут, мышьяк, сурьма, германий, индий, серебро, ртуть, кобальт, никель, ванадий, молибден, вольфрам и др.*) с принудительной коагуляцией коллоидного осадка, предложенное и для концентрирования микроэлементов природных вод [Миллер, Степанов, 1961], может выполняться непосредственно в маршруте. Метод применим к кислотным вытяжкам, что является его преимуществом перед многими другими. Постоянная основа (сульфид кадмия), легко и равномерно испаряющаяся из электрода или при просыпке, способствует равномерному поступлению соосажденных микроэлементов в электрическую дугу. Это привело к разработке концентрирования с образованием сульфида кадмия по методу возникающих реактивов (при использовании тиаоацетамида) и последующего количественного спектрального определения субмикrogramмовых количеств висмута ($1 \cdot 10^{-6}\%$), сурьмы ($1 \cdot 10^{-5}\%$), мышьяка ($1 \cdot 10^{-4}\%$), олова ($3 \cdot 10^{-6}\%$), молибдена ($3 \cdot 10^{-5}\%$), индия ($2 \cdot 10^{-6}\%$) и серебра ($1 \cdot 10^{-6}\%$) в силикатных горных породах [Миллер и др., 1977].

Н. И. Сафронов указывал на необходимость сочетания экспрессного анализа, выполнимого в полевых условиях на некоторые типоморфные элементы или их «сумму», с последующим многокомпонентным спектральным анализом [Сафронов, 1957]. Были разработаны методы для определения «суммы металлов» [Муликовская, 1957]; раздельного определения меди, цинка и свинца в водах и вытяжках [Миллер, Либина 1958]; «суммарного» и раздельного определения меди, никеля и кобальта в водах и

* При $\text{pH} \geq 5$ соосаждается еще ряд микроэлементов.

вытяжках из пород в районах развития медно-никелевого оруденения [Миллер и др., 1959]; определения мышьяка в четвертичных отложениях и коренных породах.

По-видимому, следует считать удачным, сочетание экспрессного (на базе полевой партии) определения 1—3 типоморфных микроэлементов фотометрическими или визуально-колориметрическими методами с концентрированием большей группы микроэлементов и последующим количественным спектральным анализом коллектора [Миллер, Судов, 1963; Ларионов, Самохвалова, 1973].

Способ концентрирования золота после извлечения его царской водкой со спектральным окончанием анализа был предложен самим Н. И. Сафроновым еще на Дальнем Востоке [Сафронов, 1955]. Впоследствии этот способ, приспособленный к условиям лабораторий полевых партий [Сафронов и др., 1957], был широко внедрен в поисковой геохимии. Это в свою очередь вызвало «цепную реакцию» исследований, направленных на выяснение физико-химических форм существования золота в различных природных условиях и создания высокочувствительных методов его определения [Фишер, 1974]. Был разработан и опробован метод концентрирования золота в природных водах для последующего спектрального анализа путем соосаждения с каломелью в момент ее образования [Миллер и др., 1961]. Он имеет преимущество в чувствительности перед методом соосаждения с теллуrom, и важно, что в числе спутников золота, количественно соосаждающихся с каломелью (Ag, Sn, Se, Te, As, Sb, Tl, Pd, Pt), не теряется теллур. Практически это показано как в упомянутой работе, так и при изучении природных вод Алданского района [Боровицкий и др., 1966]. Этот метод концентрирования был впоследствии применен и к анализу горных пород, но не для замены метода, разработанного Сафроновым и другими, весьма удобного для использования на базе полевой партии, а для дополнения его там, где требуется еще более высокая чувствительность (например, при выявлении погребенных ореолов), и при работе с глинистыми и сильно ожелезненными пробами. Впоследствии соосаждение с каломелью применяли в сочетании с новым способом разложения проб (без применения царской водки), обеспечивающим быстроту фильтрации суспензии и исключаящим потери золота [Миллер, Фишер, 1973]. В связи с последним методом интересно вспомнить замечание Н. И. Сафронова о том, что «... иногда в торфяниках и природных алюмосиликагелях содержания элементов, дающих растворимые в воде соли, благодаря накапливанию сорбцией из разведенных растворов, могут достигать заметных величин, однако никакой связи с концентрациями в коренном залегании нет» [Сафронов, 1957]. Химико-спектральным методом с разложением проб без применения царской водки было проведено опробование в рудном поле на фланге Итака-Могочинской металлогенической зоны и показано, что золото в основном связано с гумусовыми кислотами, и его концентрации, значительно превышающие фоновые, обусловлены, вероятно, длительной мобилизацией из природных вод [Фишер и др., 1974]. Таким образом, и в частном случае вторичных ореолов рассеяния золота подтверждается возможность (в связи с характером ландшафта) специфического накопления элемента, не связанного с рудопроявлением.

Большое значение для поисковой геохимии Н. И. Сафронов придает определению группы «элементов широкого рассеяния», в том числе галогенов, особенно йода и брома, не образующих соединений с силикатами горных пород [Сафронов, 1963]. Были разработаны достаточно чувствительные и производительные методы определения этих элементов практически в любых типах горных пород. Особенно это относится к йоду, кинетический метод определения которого обеспечивает предел обнаружения 0,5 мкг/л воды и $2 \cdot 10^{-5} \%$ в горных породах [Миллер, Шнейдер, 1963; Шнейдер, Миллер, 1965] при исследовании первичных ореолов йода гид-

ротермальных месторождений различного типа, в том числе глубокозалегающих и «слепых». В свою очередь, его первое применение [Лапш, Судов, 1963₁] побудило выполнение серии исследований геолого-геохимического порядка, связанных с выяснением формы ореолов, их протяженности, расстояния от рудного тела, отношений фоновых и аномальных концентраций, формы нахождения йода, связей с матричными минералами, сорбируемости, соосаждаемости с сульфидами и т. д. Объем статьи позволяет указать только некоторые из известных автору работ [Лапш, Судов, 1963₂; Миллер и др., 1968; Шнейдер, 1966; Крылова, 1971; Побоква, 1969; Варданын, 1971; Крылова и др., 1972; Читаева и др., 1971; Вершковская и др., 1974]. Опыттно-производственные испытания метода продолжают.

На необходимость определения весьма низких (кларковых и закларковых) концентраций элементов неоднократно указывалось Н. И. Сафроновым (1967 и др.). Высокая чувствительность определения многих элементов обеспечивается как при эмиссионном спектральном анализе (прямые методы с камерным электродом, химико-спектральные — с предварительным концентрированием), так и при атомно-абсорбционном с экстракционным концентрированием.

Все шире внедряются в работу геохимических организаций активационные и рентгено-радиометрические методы, обеспечивающие высокую чувствительность анализа ряда элементов. Однако высокочувствительные методы с простым аппаратурным оформлением имеют свои преимущества и не теряют значения. Пример тому — кинетический метод определения йода, разработанный под влиянием идей Н. И. Сафронова. Разработка этого метода показала, что при подборе достаточно избирательной индикаторной реакции и простых методов отделения мешающих компонентов может быть достигнута высокая чувствительность и точность при технических средствах, доступных даже небольшой полевой партии. Известно, что чувствительность кинетических методов очень велика, и для многих элементов не уступает активационным методам. Нами были разработаны кинетические методы определения серебра и рения в горных породах с пределом обнаружения серебра $1 \cdot 10^{-6} \%$ [Гроссе, Миллер, 1974; Гроссе и др., 1975; Гроссе, 1977] и рения $2 \cdot 10^{-7} \%$ * [Миллер, 1974; Миллер, Гроссе, 1976], а также рения в природных водах с пределом обнаружения $2 \cdot 10^{-8}$ г/л [Миллер, Волков, 1974]. Все эти методы нашли применение при анализе самых разнообразных природных объектов и при решении различных задач, выходящих за пределы поисковой геохимии. В качестве примера можно указать использование колебаний кларка рения для исследования условий седиментации древнейших отложений [Лейтес и др., 1977].

Таков далеко не полный перечень прямых и косвенных влияний идей Н. И. Сафронова на развитие методов анализа природных образований.

ИМГРЭ, г. Москва

Н. Н. СОЧЕВАНОВ, С. В. ГРИГОРЯН, А. А. ГОЛОВИН

ПОИСКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АССОЦИАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕРВИЧНЫХ ОРЕОЛАХ

Исследование с помощью корреляционного анализа распределения элементов в первичных геохимических ореолах на ряде гидротермальных рудных месторождений показало чрезвычайную чувствительность кор-

* При небольшом увеличении времени анализа — $5 \cdot 10^{-8} \%$.

реляционных связей и возможность их использования для установления геохимических ассоциаций элементов, под которыми авторы понимают совокупности элементов, сближенных в пространстве или во времени при наличии значимых корреляционных связей друг с другом.

Использование корреляционного анализа и выявление геохимических ассоциаций имеет важное значение при изучении месторождений, характеризующихся многостадийностью оруденения и пространственным наложением ореолов разных ассоциаций в пределах одной рудной структуры. В ряде случаев может быть уточнена последовательность расположения элементов в ряду геохимической зональности.

В вычислительном центре ИМГРЭ в настоящее время разработаны и широко используются программы, позволяющие устанавливать корреляционные связи при парной и ранговой корреляции. Как правило, исследуются содержания 15—25 элементов, определяемых спектральным анализом с достаточной чувствительностью. Обычно подбирается в исследуемый массив от 20 до 40—50 проб, отобранных из определенной части рудного тела: над-, верхнерудной, центральной, ниже- и подрудной зон. Для пологопадающих рудных тел дополнительно исследуются еще 1—3 массива, расположенные висячем и лежащем боку на разных расстояниях от рудного тела. Количество массивов, по которым производились расчеты корреляционных связей, для отдельных месторождений колеблется от 7—10 до 20—30.

Учитывались корреляционные связи, начиная с 5%-ного уровня значимости. Такие расчеты проведены сейчас для ряда месторождений различного элементного состава: ртутных, золотых, полиметаллических, оловянно-вольфрамовых и др. Помимо составления обычных широко используемых корреляционных матриц, было применено два приема графического обобщения данных о корреляционных связях.

Первый прием. Все элементы, имеющие между собой корреляционные связи, располагаются по квадрату. В верхней горизонтальной части квадрата помещаются над- и верхнерудные элементы геохимического ряда. По правой вертикальной линии квадрата — основные рудные элементы, приуроченные, как правило, к средней части ряда. По нижней стороне квадрата располагаются нижнерудные элементы, а по левой вертикальной линии — элементы, характеризующиеся выносом из рудной зоны.

Расположение элементов в квадрате для всех подсчетных блоков данного месторождения строго постоянно. Наличие положительной корреляционной связи изображается в виде сплошной линии, соединяющей символы коррелирующихся элементов, при значимой отрицательной связи проводится соответственно пунктирная линия. Из этих схем достаточно ясно видно наличие или отсутствие связи между верхнерудными, центральными и нижнерудными элементами ряда.

Второй прием можно назвать составлением структурных схем корреляционных связей элементов. Три элемента, имеющие значимые корреляционные связи друг с другом, изображаются в виде треугольника. При наличии четырех, пяти и шести связей изображаются фигуры с соответствующим числом углов.

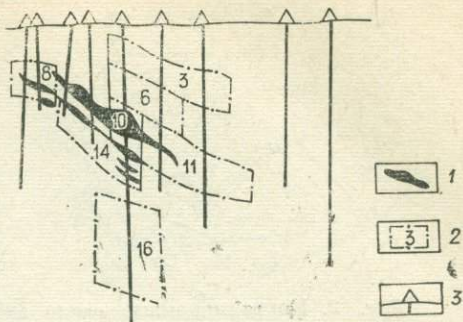
Выяснилось, что почти 50% всех корреляционных связей могут быть сведены в геохимические ассоциации, состоящие из 4—7 элементов, где каждый элемент связан значимой корреляционной связью со всеми элементами, входящими в ассоциацию.

Приведем пример использования и интерпретации данных корреляционного анализа. На Золотушинском месторождении (Рудный Алтай) по одному из разрезов исследованы ранговые корреляционные связи по семи блокам, положение которых показано на рис. 1.

Рудовмещающая толща представлена переслаиванием аргиллитов, алевролитов и туфов кислого состава в области контакта вулканогенно-осадочной березовской свиты среднего девона с перекрывающими лавами

Рис. 1. Золотушинское месторождение (разрез).

1 — рудные тела; 2 — границы блоков расчета корреляционных связей между элементами и их порядковые номера; 3 — буровые скважины.



и лавобрекчиями липаритов таловской свиты. Рудные тела приурочены к пологозалегавшему (30—45°) крылу антиклинали и представлены линзо-, трубообразными и штокверковыми формами. Отмечается контрастная зональность руд: серно-колчеданные, медные и медно-цинковые приурочены к лежащему боку рудной зоны; медно-цинковые и колчеданно-полиметаллические — к средним горизонтам; полиметаллические и барит-полиметаллические — к висячему боку рудной зоны. Ряд зональности для месторождения (сверху вниз):

Hg—Ba—Ag—As₂—Pb—Cd—Zn—Cu—Bi—Mo—As₁—Co—Ni—Sn—W.

Как видно из рис. 1, блоки 3 и 6 находятся в висячем боку на разных удалениях от рудной зоны; блоки 8, 10, 11 — в пределах верхнерудной, центральной и нижнерудной частей рудоносной зоны; блоки 14 и 16 — как непосредственно в лежащем боку рудной зоны, так и в удалении от руды.

Табл. 1 характеризует количество корреляционных связей (исследовалось распределение 14 элементов, приведенных на рис. 2) в рассматриваемых блоках, причем хром, ванадий и марганец являются элементами выноса и в ряд зональности не включены; ртуть, золото и вольфрам не рассматриваются из-за недостаточного количества значащих цифр в результатах анализов.

Таблица 1

Характер корреляционных связей по блокам Золотушинского месторождения

Номер блока	Общее количество значимых связей		Количество значимых связей верхних элементов ряда с элементами					Полное количество связей средних элементов ряда
	положит.	отрицат.	со всеми	с верхними	со средними	с нижними	с элементами выноса	
3	8	1	$\frac{6}{75}$	1	$\frac{5}{62}$	0	0	$\frac{8}{100}$
6	14	1	$\frac{6}{43}$	1	$\frac{4}{28}$	1	0	$\frac{7}{50}$
8	42	0	$\frac{15}{36}$	3	$\frac{10}{24}$	2	0	$\frac{26}{62}$
10	38	0	$\frac{17}{45}$	2	$\frac{8}{21}$	5	2	$\frac{26}{68}$
11	37	0	$\frac{14}{38}$	1	$\frac{5}{13}$	4	4	$\frac{23}{62}$
14	13	2	$\frac{3}{23}$	0	$\frac{2}{15}$	0	1	$\frac{7}{54}$
16	9	3	$\frac{3}{33}$	1	$\frac{1}{11}$	0	1	$\frac{4}{45}$

Примечание. В числителе — количество значимых связей, в знаменателе — процент связей данной колонки к общему количеству положительных связей.

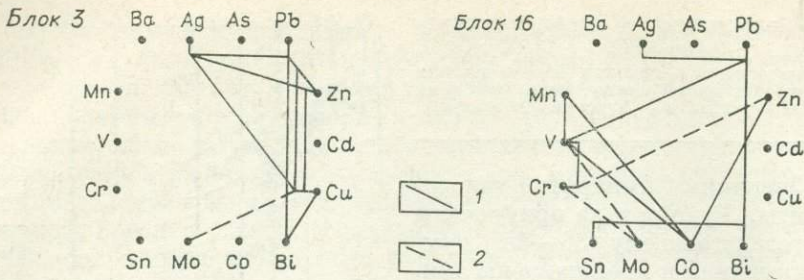


Рис. 2. Корреляционные связи между элементами ряда зональности.
1 — значимые (5%) положительные корреляционные связи между содержаниями элементов; 2 — то же, но отрицательные.

Как видно из табл. 1, количество связей в над- и верхнерудной зоне (блок 8) несколько выше, чем в центральной и нижнерудной зоне; количество связей в рудной зоне в 3—5 раз выше, чем висячем и лежащем боку; наиболее резко изменяется процент связи верхних элементов со средними по отношению к общему числу связей (см. колонку 6 табл. 1). Процент связи висячем боку даже в удалении свыше 100—200 м от рудной зоны в 2—5 раз выше этой же величины в лежащем боку (блоки 3 и 6 по сравнению с блоками 14 и 16 колонки 6); процент связей, приведенный в колонках 4 и 9 табл. 1, имеет ту же тенденцию, что и в колонке 6, но различие между указанными величинами висячем и лежащем боку значительно меньше; колонки 5, 7, 8 из-за малого числа случаев связи являются статистически ненадежными и не рассматриваются.

Пример изображения корреляционных связей между элементами, расположенными в разных частях ряда зональности, дан для двух блоков на рис. 2.

Структурные связи между содержаниями элементов изображены на

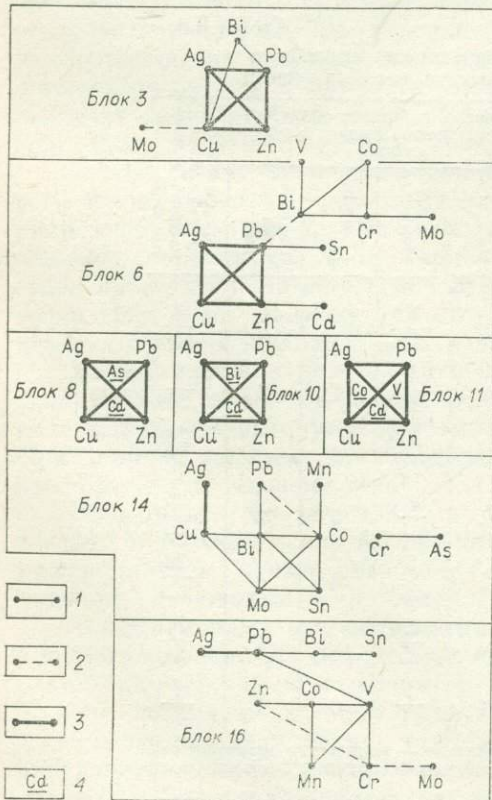


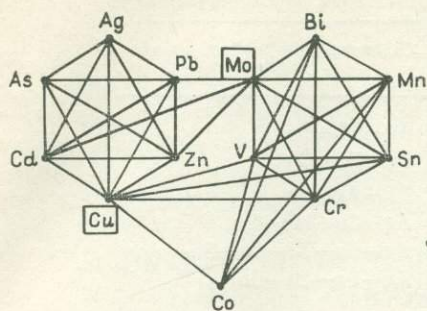
рис. 3 и 4, причем на рис. 3 структурные корреляционные связи даны полностью только для блоков висячего и лежащего бока (№ 3, 6, 14, 16), а для блоков, расположенных в пределах рудной структуры (№ 8, 10, 11), они упрощены. Полный характер корреляционных связей для этих блоков дан на рис. 4. Кроме того, на рис. 3 особым знаком выделены корреляционные связи между основными рудными элементами, которые из-за большого количества связей в рудных блоках (№ 8, 10, 11) нечетко выделяются на рис. 4.

Из этих наблюдений можно сделать ряд выводов.

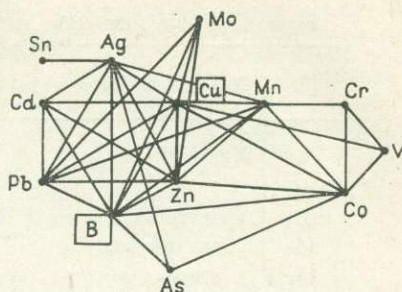
Рис. 3. Структура корреляционных связей.

1 — значимые положительные связи между элементами; 2 — то же, но отрицательные; 3 — значимые положительные корреляционные связи с четырехэлементной геохимической ассоциацией; 4 — элементы, имеющие значимую корреляционную связь со всеми четырьмя рудными элементами ассоциации.

Блок 8



Блок 10



Блок 11

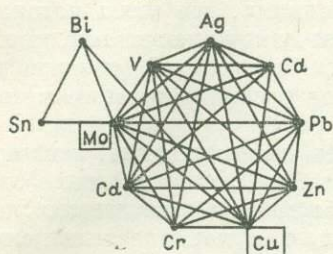


Рис. 4. Полная структура корреляционных связей для блоков рудной зоны.

1 — значимые положительные корреляционные связи между элементами; 2 — узловыи элементы для данного блока.

1. Основная рудная ассоциация $Ag-Pb-Cu-Zn$ полностью проявляется в рудной зоне и в блоках висячего бока, но распадается в блоках лежащего бока.

В состав рудной ассоциации в рудных блоках, помимо указанных четырех элементов, дополнительно входят 2—3 элемента (As, Cd и др.), для которых характерны положительные значимые корреляционные связи со всеми четырьмя элементами ассоциации.

Для верхнерудного блока № 8 характерна связь ассоциации с мышьяком, для центральной части (блок № 10) — с висмутом, для нижнерудных горизонтов — с кобальтом и ванадием. Кадмий является сквозным элементом, значимые связи с ним отмечаются во всех рудных блоках (см. рис. 3).

2. Для рудных блоков характерны две геохимические ассоциации $Ag-Pb-Zn-Cu-Cd$ и $Mn-Cr-V$ (см. рис. 4). Связи в последней ассоциации менее устойчивы, чем в первой. На некоторых горизонтах наблюдается связь элементов второй ассоциации с Mo, Bi, Co, Sn. Очень отчетливо видно разделение девятиэлементной ассоциации блока 11 (связь $Cd-Cr$ — 7%-ный уровень значимости) вверх по восстанию на две ассоциации по шести элементам в каждой.

3. На рис. 4 выделены особым знаком медь, молибден и висмут. Их особенностью является максимальное количество значимых корреляционных связей. Помимо связи со всеми элементами своей ассоциации, для них характерна связь с несколькими элементами другой ассоциации (блок № 8) или отдельными элементами, не входящими в ассоциацию (блоки № 10, 11). Таким образом, эти элементы являются узловыми, определяющими наличие связей между геохимическими ассоциациями.

Наиболее характерны связи меди и молибдена на примере блока 8 (см. рис. 4), объединяющие две обособленные ассоциации. В какой-то мере объединяющую роль играет и кобальт (блоки 8 и 10, см. рис. 4), но сам он является внешним элементом по отношению к геохимическим ассоциациям и характеризуется меньшим количеством связей по сравнению с узловыми элементами этих блоков.

Геохимические цепочки для Золотушинского месторождения

Номер блока	Положение блока в рудной зоне	Характер линейной связи элементов
6	Висячий бок	Ag—Pb—Sn Cd—Zn—Cu
10	Центральная часть	Pb—Ag—Sn
14	Лежачий бок	Ag—Cu—Mo—Sn
14	» »	Ag—Cu—Bi—Co—Sn
16	Лежачий бок вдали от нее	Ag—Pb—Bi—Sn

4. Наряду с геохимическими ассоциациями, представленными на структурных схемах замкнутыми многоугольниками, все углы которых соединены друг с другом, отмечаются еще связи между элементами, имеющие линейный характер. Примеры таких линейных связей (назовем их геохимическими цепочками) для разных блоков рассматриваемого месторождения даны в табл. 2.

Для других месторождений установлены геохимические цепочки, состоящие из 7—8 элементов. Как видно из табл. 2, расположение элементов в цепочке соответствует положению элементов в геохимическом ряду зональности и, возможно, свидетельствует о порядке выпадения элементов из комплексного гидротермального раствора.

* *

*

Использование корреляционного анализа для изучения связей между элементами при исследовании первичных ореолов имеет как практическое, так и теоретическое значение. Корреляционные связи в блоках, расположенных в надрудной части рудной структуры или в висячем боку в достаточном большом удалении от нее, позволяют выявлять основную геохимическую ассоциацию, характеризующую главные элементы рудной зоны.

При количестве значимых корреляционных связей, в 3—5 раз превышающем количество таких же связей во вмещающих породах, оцениваемую геохимическую аномалию следует считать более перспективной, чем при незначительном увеличении связей, что характерно для ореолов, развивающихся над зонами рассеянной минерализации.

Построение структурных схем корреляционных связей делает материал значительно нагляднее по сравнению с обычно приводимыми корреляционными матрицами, позволяя выделять геохимические ассоциации, узловые элементы и геохимические цепочки, анализ которых позволяет сделать дополнительные выводы о генетической стороне формирования геохимических ореолов и связанных с ними рудных тел.

Уточним формулировки этих понятий.

Геохимическая ассоциация (по приведенным данным) — пространственная совокупность из четырех и более элементов, каждый из которых имеет значимую корреляционную связь со всеми элементами ассоциации.

Узловой элемент — элемент, входящий в геохимическую ассоциацию, имеющий максимальное количество значимых корреляционных связей и объединяющий данную ассоциацию с другой ассоциацией или с элементами, не входящими в ассоциацию.

Геохимическая цепочка — ряд, состоящий из четырех и более элементов, каждый из которых имеет с соседним элементом цепочки значимую положительную корреляционную связь при отсутствии таковой между удаленными элементами цепочки.

«Построение комплекса должно быть таким, чтобы недостатки одного вида поисковых приемов восполнялись достоинствами другого, а самый комплекс образовывал единый механизм, позволяющий экономично и уверенно решать возникающие задачи».

[Сафронов, 1971, с. 150]

Б. П. САНИН

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ПУТЕМ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНЫХ ПОЛЕЙ И КЛАСТЕР-АНАЛИЗА

Повышение эффективности интерпретации комплексных геохимических аномалий во многом зависит от правильного сочетания методов многомерной статистики при обработке геохимической информации.

Примером этому может служить применение метода многомерных полей и кластер-анализа при обработке геохимических данных одного кварц-сульфидного месторождения на ЭВМ.

Месторождение сложено эффузивами среднего и основного состава: трахиандезитами, трахиандезито-базальтами, андезит-базальтами, туфоловами. Эффузивы пересекаются дайками гранодиорит-порфиров, диоритовых порфиритов и лампрофиров.

На месторождении выделены четыре сближенные рудоносные зоны северо-восточного простирания 1, 2 и 4-я из них бедные, 3-я вмещает рудное тело. Мощность рудного тела 3-й зоны колеблется от 0,33 до 3,53 при средней мощности 0,96 м.

В состав руд входят пирит, арсенопирит, халькопирит, галенит, сфалерит, блеклая руда, висмутин, редко пирротин и бурнонит. Золото макроскопически не обнаружено. По минеральному составу оруденение кварц-колчеданное, высокотемпературное. Полиметаллы на месторождении имеют подчиненное развитие и характеризуют более позднюю стадию. Жильные минералы — кварц и карбонаты; кварц ассоциируется с колчеданным оруденением. Рудные тела представлены обычно окварцованными эффузивами, насыщенными гнездами, прожилками и вкрапленностью пирита, халькопирита и арсенопирита. Многочисленные прожилки и жилки карбоната пересекают кварц-пиритовые образования.

Все эффузивы участка месторождения несут следы региональной процилитизации. В рудоносных зонах они изменены гидротермальными процессами. С глубиной интенсивность гидротермального изменения пород усиливается. Возникающие в рудоносных зонах гидротермалиты можно классифицировать как листовениты, насыщенные вкрапленностью пирита. На юго-западном фланге месторождения в долине реки был пробурен профиль из четырех скважин (рис. 1). Глубина скважин составила соответственно 243, 192, 189 и 232 м. Скважинами вскрыты 3, 4 и частично 2-я зоны. Кроме того, вскрыт ряд новых зон. Все скважины опробованы пунктирным методом с интервалом в 5 м. В минерализованных и гидротермально измененных участках интервал опробования сгущался до 0,2—0,5 м. Пробы анализировались на Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Mo, Sn, V, Cr, Ti, As, Sb, Bi и частично на Hg. Количественная обработка исходной информации методами многомерных полей и кластер-анализа осуществлялась на ЭВМ.

Сущность метода многомерных полей [Евдокимова, 1978] заключается в том, что каждая из проб относится к определенному пространственно обособленному классу, в основу выделения которого положен набор химических элементов и величина их концентрации. Полученные таким

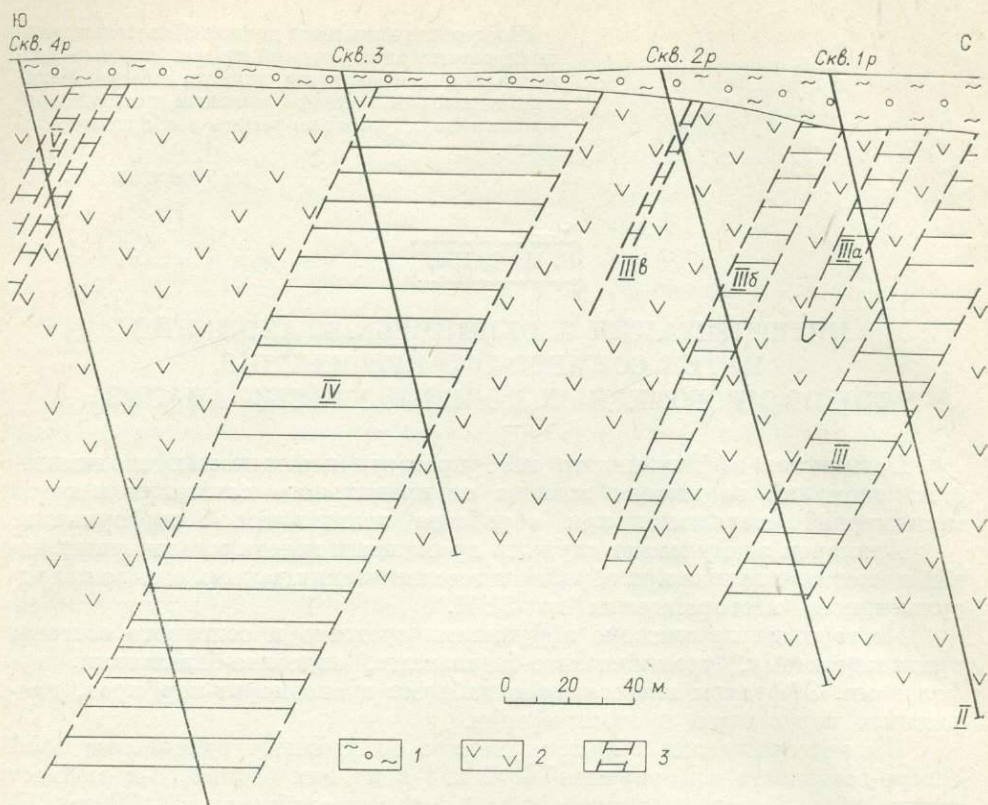


Рис. 1. Схематический геологический разрез (сскв. 4р-1р) кварц-сульфидного месторождения.

1 — рыхлые отложения; 2 — гидротермально измененные эффузивы; 3 — рудные зоны (названия обозначены римскими цифрами).

образом классы ассоциаций представляются в виде полиэлементной карты. По ассоциациям можно судить о их зональности и типе рудной минерализации. Наряду с картой классов ассоциаций, ЭВМ выдает карты, изображающие распределение концентрации каждого элемента. Наиболее сложный вопрос при интерпретации полученных результатов методом многомерных полей — разложение комплексных геохимических ореолов на однородные ассоциации, отвечающие отдельным стадиям минерало- и ореолообразования.

Методом многомерных полей обрабатывались результаты анализа проб на Ag, Au, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Mo, Sn, V, Cr, Ti. Мышьяк, сурьма и висмут, встречающиеся крайне редко в пробах разреза, в машинной обработке не участвовали. Наиболее характерными для ореолов оказались Au, Ag, Pb, Cu, менее характерен Zn. Титан, никель и ванадий не образуют ореолов. Не типичны для разреза и Mo, Sn, Cr, Co, хотя аномальные концентрации этих элементов и встречаются в различных частях изученного разреза.

Методом многомерных полей выделено 11 классов ассоциаций, которые были сгруппированы нами в семь групп ассоциаций (табл. 1). Седьмая группа элементов соответствует местному фону.

Золото-колчеданный тип минерализации характеризуется ассоциацией элементов 1-й группы с высокой контрастностью золота. Совместно с Au в этой ассоциации присутствуют Cu, Pb и Sn, но с низкой контрастностью ($KK=2-5$). Ассоциации элементов группы 3 соответствуют золото-полиметаллическому типу оруденения и характеризуются высокими контрастностями Pb, Ag и Cu и меньшими для золота. Группы элементов

Классы ассоциаций элементов кварц-сульфидного месторождения

Группа классов	Индекс класса	Коэффициент контрастности										Коэффициент однородности	
		Au	Ag	Pb	Cu	Zn	Sn	Mo	Ni	Co	Cr		Ti
1	Е	190		5	4		2						0,91
	Б	88		4	3		2						0,95
2	≡	63	3	40	7		2	2					0,85
3	М	57	50	112	18		2						0,99
	Ж	39	90	220	19		2	4					0,98
	И	76	40	117	20		3		10	2			0,96
4	К	12	4	8	9	2							0,87
5	В	26	7	5	2	2							0,69
	А	18	3	3									0,69
6	Ж	28		22	2	2			2		2	2	0,84
7	Г			4	2								0,84

(2, 4, 5, 6) отражают особенности распределения элементов в околорудных гидротермалитах, несущих признаки как золото-колчеданной, так и полиметаллической минерализации (рис. 2).

Анализ строения ореолов и элементного состава ассоциаций показывает, что многостадийный характер рудоотложения затушевывает общую картину зональности в рассматриваемом разрезе. В целом отмечается, что Pb, Zn, Ag концентрируются в основном в центральной части разреза (зоны 3 и 4), где проявлена полиметаллическая минерализация. Золотая минерализация отмечается во всех частях разреза.

О сложности размещения классов ассоциаций в изучаемом разрезе свидетельствует коэффициент однородности. Так, значения коэффициента однородности меньше 0,7 отвечают неоднородным ассоциациям элементов и природа их может истолковаться в отдельных случаях как совмещение в пространстве разных стадий гидротермального процесса. Примером этому служат классы ассоциаций В и А (см. табл. 1), коэффициенты однородности которых составляют 0,69. Они характеризуют участки развития пропилитизированных и лиственизированных пород.

С целью выявления закономерностей в распределении полей ассоциаций в зависимости от состава вмещающих пород и характера проявления рудной минерализации в дополнение к полиэлементным картам, составленным по методу многомерных полей, был использован метод кластер-анализа.

Кластер-анализ [Другов и др., 1971], подобно факторному, предусматривает кластирование переменных (анализ R-типа) и кластирование отдельных объектов (анализ Q-типа). В анализе R-типа оценивается коррелированность используемых переменных. В этом случае каждая переменная помещается в кластер как отдельный элемент, что позволяет в дальнейшем исследовании использовать не все переменные, но наиболее

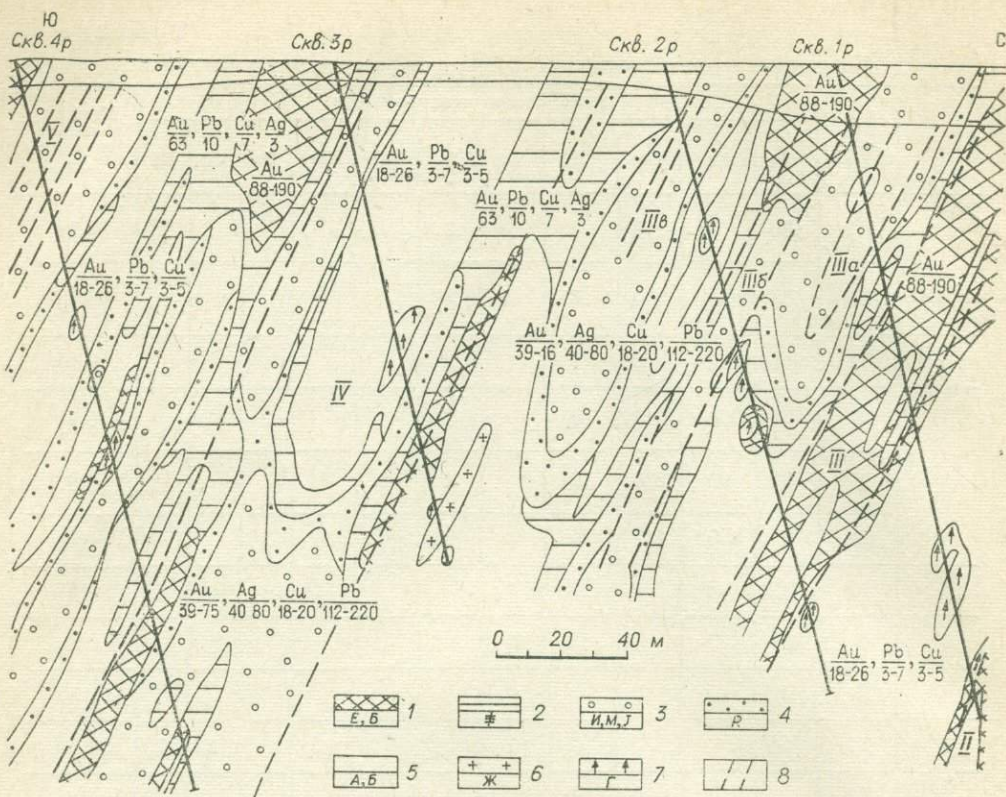


Рис. 2. Схема ассоциаций элементов кварц-сульфидного месторождения в разрезе скв. 4р-1р.

1—7 — классы ассоциаций (см. табл. 1); 8 — граница рудных зон.

представительные для данного кластера. В общем случае кластер- и факторный анализы дают сходные результаты для R-типа, но в кластер-анализе каждая переменная помещается в отдельный кластер, тогда как в факторном анализе переменные могут быть связаны с различными факторами.

Для анализа Q-типа факторный и кластер-анализы дают сходные результаты при слабой зависимости или некоррелированности переменных, но в случае кластер-анализа независимость переменных может быть достигнута предварительным кластеризированием переменных. В этом смысле кластер-анализ выполняет одни и те же задачи, что и факторный, но в отличие от последнего может использовать значительно большее количество переменных.

На полученной дендрограмме Q-типа четко выделились пять групп (рис. 3). Группы 1 и 3 составили соответственно пропилизитизированные трахиандезиты, трахиандезито-базальты и базальты, андезитобазальты.

Во 2-ю и 4-ю группы вошли соответственно те же породы, но претерпевшие гидротермальные изменения типа лиственитизации. Пятую группу образовали рудные пробы. Между первыми четырьмя группами отмечается тесная связь, что может служить признаком сходного происхождения гидротермально измененных пород. По характеру множественной корреляционной связи между элементами внутри каждой группы выделяются более мелкие подгруппы проб, характеризующие участки пород с разной степенью их изменения. В группах проб 2 и 4 обособляются три подгруппы, которые соответствуют разным зонам лиственитов, это находит подтверждение в изменении уровней концентрации рудных элементов в сторону

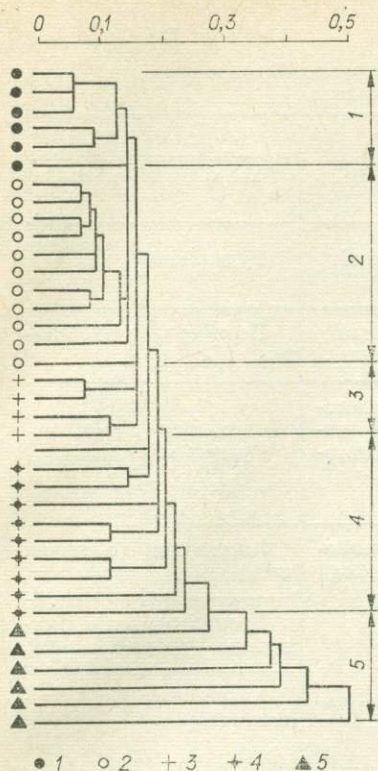


Рис. 3. Кластерование гидротермально измененных пород по геохимическим признакам (дендрограмма Q-типа).

1 — пропилитизированные трахиандезиты и трахиандезито-базальты; 2 — лиственитизированные трахиандезиты, трахиандезито-базальты; 3 — пропилитизированные базальты и андезитобазальты; 4 — лиственитизированные базальты и андезитобазальты; 5 — рудная зона.

ные группы рудных элементов и элементов-примесей. Между этими группами отсутствует корреляционная связь. Внутри своих групп выделяют группы элементов, имеющие между собой высокую положительную связь (Ag, Cu, Pb и Ni, Cr, V). Заслуживают внимания Mo, Sn и Co, которые не имеют значимых связей с золотой и полиметаллической минерализацией и, по-видимому, являются представителями редкометалльной минерализации, которая широко развита в районе. Положительная корреляционная связь Hg с Ti ($r = 0,5$) свидетельствует о возможности концентрирования ртути на дорудном этапе преобразования пород.

В целом применение кластер-анализа при интерпретации комплексных ореолов позволяет более четко осуществить процедуру разложения их на близко однородные ассоциации, характеризующие разные стадии минерало- и ореолообразования. Применение кластер-анализа при интерпретации карт ассоциаций, построенных методом многомерных полей, позволяет выделить однородные поля ассоциаций элементов, отвечающие определенным типам оруденения и окolorудно измененным породам (табл. 2).

Классы элементов (Е, Б) соответствуют золото-колчеданному типу минерализации. В этом типе оруденения свинец, медь и олово — элементы-спутники золота и характеризуются низкими коэффициентами кон-

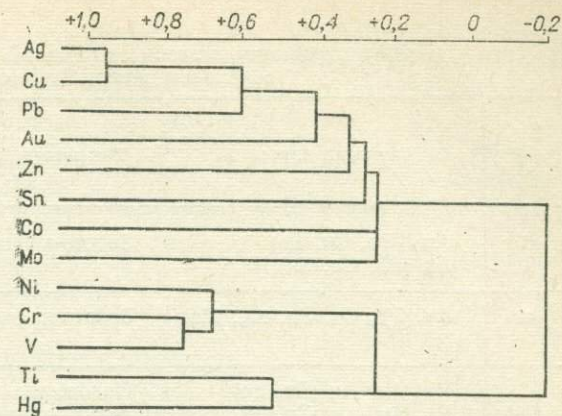


Рис. 4. Множественная корреляция между элементами по данным кластер-анализа R-типа.

уменьшения к внешним границам рудной зоны и некоторого увеличения Ni, V, Cr.

Рудные пробы (группа 5) показывают наиболее удаленную связь со всеми остальными образованиями. Внутри этой группы четко выделяются крайние пробы в кластерованном ряду, которые имеют слабую связь между собой и характеризуют золото-колчеданный и золото-полиметаллический типы оруденения. Кроме этого, сближенные пробы в группе 5 несут геохимическую характеристику разным гипсометрическим уровням рудной зоны, что соответствует элементам вертикальной зональности.

Характер множественной корреляции между элементами в пробах устанавливается на графиках R-типа (рис. 4), где видно четкое разделение на две обособлен-

Интерпретация классов ассоциаций полиэлементных карт
с использованием кластер-анализа

Индекс класса	Формула класса	Тип минерализации	Пространственное положение и тип изменения
Е Б	Au (Pb, Cu, Sn) Au (Pb, Cu, Sn)	Золото-колчеданный	Рудная зона
≡	Au (Pb, Cu, Sn, Ag, Mo)	Золото-колчеданный	Периферия рудной зоны
М J И	Pb, Au, Ag (Cu, Sn) Pb, Ag, Au (Cu, Mo, Sn) Pb, Au, Ag (Cu, Ni, Sn, Co)	Наложение золото-полиметаллической минерализации на золото-колчеданную	Рудная зона
К	Au (Cu, Pb, Ag, Zn)	Околорудные изменения вмещающих пород	Листвениты (ближняя зона)
В А	Au (Ag, Pb, Cu, Sn) Au (Pb, Ag)		Прошилиты и листвениты (дальняя зона)
Ж	Au, Pb (Cu, Zn, Ni, Cr, Ti)		Листвениты (ближняя зона)

трастности ($KK=2-5$). Классы элементов М, J, И отражают совмещенный в пространстве золото-колчеданный и золото-полиметаллический типы минерализации. Другие классы элементов соответствуют разным типам гидротермально измененных пород.

Итак, совместное использование методов многомерных полей и кластер-анализа при обработке геохимических данных позволяет не только уверенно выделить устойчивые классы ассоциаций элементов, но и объяснить установленные взаимосвязи отдельных явлений и воссоздать механизм процессов минерало- и ореолообразования.

Институт геохимии

им. академика А. П. Виноградова СО АН СССР, г. Иркутск

Р. И. ДУБОВ

ПРОСТРАНСТВЕННО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Пространственно-статистическая модель — это модель, отражающая общие свойства (характеристики) некоторого множества объектов, причем в число свойств может входить изменение каких-то величин в пространстве, занимаемом моделируемым объектом. Модель создается на основании теоретических соображений и результатов наблюдений, содержащих полезную и шумовую составляющие. Далее такие модели для краткости называются просто статистическими, хотя обычно так называются модели, отражающие только числовые характеристики объектов в целом, без изменения в пространстве внутри объектов.

Объект, априори неизвестный, для которого создается модель, называется распознаваемым объектом.

Данные, используемые для создания модели, называются обрабатываемым материалом, или материалом для распознавания. Используемые при создании модели теоретические знания и данные о других объектах, уже изученных, составляют обучающий материал.

Необходимость в моделях геохимических полей возникла потому, что исходные данные, используемые непосредственно, без учета их взаимных связей, отражаемых моделями, оказались недостаточными для решения геохимических задач.

Статистические модели, используемые для описания геохимических аномалий, бывают различного рода.

ПРОСТЕЙШИЕ МОДЕЛИ

Простейшие модели — это совокупность статистик, или статистических параметров (например, средняя концентрация, дисперсия, коэффициенты корреляции и так далее).

Эти модели используются для общей характеристики аномалий. Они широко известны и описаны детально в литературе [Kendall, 1968; и др.]. Поэтому мы не обсуждаем их. Заметим лишь, что после широкого использования оказалось, что такие отдельные параметры недостаточны для многих задач.

КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ

Здесь статистические параметры рассматриваются взаимосвязанно. Конструируется ограниченное число классов с различными взаимоотношениями параметров. Каждый класс может рассматриваться как подмодель, т. е. модель некоторого рода аномалий, связанных с рассматриваемыми объектами (например, промышленными и непромышленными рудными месторождениями). Существует много способов для конструирования классов. Однако известно из математики, что наиболее точная классификация — это классификация, использующая так называемый Байес-анализ. Этот анализ базируется на формуле

$$P(R_k | x_j) = \frac{P(R_k) \cdot p(x_j | R_k)}{\sum_{k=1}^K p(x_j | R_k)} \quad (1)$$

Здесь $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{mj})$ — вектор характеристик (свойств) или признаков объекта r_j ; $i = 1, 2, \dots, m$ — индекс признака. Каждый признак — непрерывная величина. $j = 1, 2, \dots, n$ — номер объекта. $P(R_k)$ — абсолютная, безусловная вероятность того, что объект r_j принадлежит классу R_k . $P(R_k | x_j)$ — условная вероятность того, что объект r_j принадлежит классу R_k ($k = 1, 2, \dots, K$); условие выражается наблюдением определенного вектора x_j . $p(x_j | R_k)$ — (условная) плотность вероятности того, что определенный вектор x_j признаков объекта r_j будет наблюден, если объект r_j действительно принадлежит к классу R_k . K — количество возможных классов.

Мы производим Байес-анализ, если относим объект r к классу R_{k_1} или R_{k_2} по формуле (1) следующим образом.

Соответственно этой формуле

$$\frac{P(R_{k_1} | x_j)}{P(R_{k_2} | x_j)} = \frac{P(R_{k_1}) \cdot p(x_j | R_{k_1})}{P(R_{k_2}) \cdot p(x_j | R_{k_2})} \quad (2)$$

Предположим, что мы знаем относительно объектов r_j только признаки x_j . Тогда число ошибок является наименьшим (в среднем), если каж-

дый объект g_j рассматривается как принадлежащий к классу R_{k_1} или R_{k_2} , когда дробь (2) больше или соответственно меньше единицы. Обозначим

$$\frac{P(R_{k_1})}{P(R_{k_2})} = \frac{1}{B}, \text{ т.е. } B = \frac{P(R_{k_2})}{P(R_{k_1})}.$$

Тогда на основании формулы (2) мы получаем правило; если

$$\frac{p(x_j | R_{k_1})}{p(x_j | R_{k_2})} > B, \quad (3)$$

то объект g_j должен быть отнесен к классу R_{k_1} . Если же

$$\frac{p(x_j | R_{k_1})}{p(x_j | R_{k_2})} < B, \quad (3a)$$

то объект g_j должен быть отнесен к классу R_{k_2} .

Если различие между величинами $P(R_{k_1})$ и $P(R_{k_2})$ неизвестно, то естественно принять $B = 1$.

Применение соотношений (3) и (3a) общеизвестно как метод максимального правдоподобия. Согласно приведенному выводу, он получается как частное выражение классификации по Байесу.

Чтобы использовать рассмотренные методы, необходимо предварительно аппроксимировать функции $p(x|R)$ по обучающему материалу. Это нелегкая задача. При обычном подходе для этого используются определенные функции с определенным числом параметров (например, нормальное одномерное распределение имеет два параметра: среднее значение и дисперсию). Природа же использует различные функции с различным числом параметров. Широко распространенный выбор аппроксимирующей функции по критериям согласия (например, χ^2), базируется, в свою очередь, на выборе уровня значимости. Но этот выбор делается субъективно. Часто это 5%-ный уровень, может быть выбран и другой. В зависимости от этого уровня результаты также различны, и обычно неизвестно, какие из них лучше.

Чтобы избежать названных и других трудностей, были разработаны многочисленные методы. Однако классификация по Байесу и метод максимального правдоподобия, как доказано теоретически, наиболее точны. Обычно предполагается, будто ошибки других применяемых методов незначительны для практики. Между тем, исследования этого вопроса показали, что дело обстоит иначе. Например, на основании теоретических соображений автор этой статьи указывал, что упрощения вычислений при линейном дискриминантном анализе могут давать серьезные погрешности. Н. М. Франковская показала это на фактическом геохимическом материале для практически важных случаев. Ошибки других методов, не базирующихся на строгой теории (так называемых эвристических методов, использующих субъективно задаваемые значения параметров и критериев), могут быть еще более существенными [Математическая обработка..., 1976].

Итак, использование классификации по Байесу и максимальному правдоподобию наиболее предпочтительно для аппроксимации статистических распределений в геохимии, но для этого необходимо иметь подходящий метод аппроксимации функций $p(x|R)$. Далее мы опишем метод, представляющийся полезным для такой цели. Но перед этим рассмотрим еще один класс моделей.

РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ

Классификация объектов по малому числу классов недостаточна для многих целей. Например, чем больше глубина залегания рудной залежи, тем больше должно быть количество руды, чтобы дальнейшее ее исследование было выгодным. Поэтому количественная оценка геохимических аномалий, даже грубая, весьма желательна.

Можно подумать, что эта задача решается классификацией в множестве классов, различающихся значениями изучаемой величины. Однако классификационные модели, описанные выше, требуют тем большего обучающего материала, чем больше число классов, при той же точности классификации. Обычно мы не имеем достаточного для этого материала.

В таких случаях полезны регрессионные модели. Изучаемая величина φ рассматривается здесь как функция вектора признаков x :

$$\varphi = \varphi(x). \quad (4)$$

Оценка функции φ делается по отображающим ее наблюдаемым значениям ψ_j на известных объектах и по признакам x этих объектов, т. е. по обучающему материалу, упомянутому выше. Результат оценки является аппроксимирующей функцией φ^* . Это модель зависимости (4). И когда мы имеем вектор признаков x для нового объекта, то мы можем оценить значение φ для него. Эта оценка есть

$$\varphi^* = \varphi^*(x).$$

Функция φ^* называется функцией регрессии величины ψ на вектор x .

Обычно в качестве функций регрессии используются параболы. Напомним, что парабола порядка L в случае одномерного аргумента x имеет форму

$$\varphi^*(x) = \sum_{k=0}^L a_k x^k,$$

где a_k — параметры (коэффициенты), вычисленные по обучающему материалу; при $k=0$ для любых x (в том числе для $x=0$) принимается $a_k x^k = a_k$.

Если аргумент двумерен, т. е. если $x_j = (x_{1j}, x_{2j})$, то аппроксимирующая парабола принимает соответственно вид

$$\varphi^*(x_j) = \sum_{k=0}^L \sum_{l=0}^{L-k} a_{kl} x_{1j}^k x_{2j}^l.$$

Имеется много хороших результатов, полученных в геологии с помощью параболической функции регрессии первого порядка [Geoffroy, Wignall, 1971; и др.]. Иногда используются параболы второго и третьего порядков. Параболы более высокого порядка применяются редко. Причина здесь заключается в следующем.

С увеличением порядка аппроксимирующей параболы могут быть отображены все более мелкие детали изучаемой зависимости. Но при этом функция φ^* следует и за изменениями, связанными с шумами, т. е. растет влияние шумов. Поэтому необходимо иметь метод для выбора оптимального порядка аппроксимирующей функции, или числа ее параметров.

Кроме того, вычисление функции регрессии очень трудно при большом числе m признаков и высоком порядке L . Если $L=3$ и число признаков $m=10$, то число параметров, которые нужно вычислить, равно 286. При $L=5$ и том же m число параметров равно 3003. Мощности лучших современных вычислительных машин недостаточно для того, чтобы вычислить эти параметры обычным методом наименьших квадратов, из-за большой плохо обусловленной системы уравнений, подлежащей решению.

Наконец, функция, используемая для аппроксимации, может иметь свойства, в принципе отличающиеся от свойств изучаемых природных зависимостей. Тогда могут проявляться несуразности. Например, при аппроксимации пространственного распределения концентраций химических элементов параболой последняя может принимать в некоторых точках отрицательные значения, в то время как в действительности концентрации могут быть только положительными. Между прочим, при использовании парабол относительно высоких порядков такие несуразности проявляются особенно часто, и это является одной из причин ограничения низкими порядками при обычном подходе.

В этой статье мы опишем метод, дающий возможность избежать упомянутые трудности.

РАНГОВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ (СУЩНОСТЬ МЕТОДА)

Теория метода описана ранее [Дубов, 1974]. Здесь мы рассмотрим лишь его сущность. Он может быть реализован с помощью ЭВМ или «вручную», хотя в сложных случаях электронная машина, разумеется, предпочтительнее. Обычно этот метод дает количественные результаты при меньших усилиях, чем требуется для неколичественных заключений многими обычными способами.

Метод называется ранговой аппроксимацией. Его идея заключается в использовании критериев, легко вычисляемых и отражающих подобие аппроксимирующей функции истинной функции. Одним из критериев является величина

$$z(\varphi^*) = \frac{n_c(\varphi^*) - n_v(\varphi^*)}{n_c(\varphi^*) + n_v(\varphi^*)}, \quad (5)$$

где $n_c(\varphi^*)$ — число случаев, когда для соседних точек x_j, x_{j+1} пара значений (ψ_j, ψ_{j+1}) имеет $\frac{1}{2}$ разности $\psi_j - \psi_j^*$ и $\psi_{j+1} - \psi_{j+1}^*$ одного знака; $n_v(\varphi^*)$ — число случаев, когда эти знаки различны. Иными словами: $n_c(\varphi^*)$ — число случаев, когда оба значения ψ_j и ψ_{j+1} в паре находятся по одну сторону от графика функции φ^* , $n_v(\varphi^*)$ — число случаев, когда график функции φ^* проходит между этими значениями (разделяет их).

Рассмотрим совокупность всех функций, которые, по предварительным соображениям, могут быть использованы для аппроксимации. Разделим их по классам таким образом, чтобы в любом классе формула каждой функции с меньшим числом параметров могла быть представлена как частное выражение формулы функции с большим числом параметров, входящей в тот же класс. Например, в классе парабол с одномерным аргументом любая парабола порядка L может быть представлена как парабола более высокого порядка, если все коэффициенты a_k с $k > L$ положить тождественно равными нулю.

Выберем из каждого класса функцию-представительницу, — такую функцию φ^* , для которой критерий $z(\varphi^*)$ принимает ближайшее к нулю значение по сравнению с другими функциями того же класса, после того как параметры функции фиксированы методом наименьших квадратов. Если несколько функций класса имеют одно и то же ближайшее к нулю значение критерия z , то в качестве функции-представительницы выбирается та из них, которая имеет наименьшее число параметров.

После этого для аппроксимации изучаемой зависимости выбирается та из функций-представительниц, которая имеет наименьшее число параметров по сравнению с остальными представительницами других классов (но не по сравнению с другими функциями классов).

Рассмотрим выбор функции-представительницы на модельном примере, где функция φ задана нами, но вычислителю сообщаются только

Рис. 1. Выбор оптимальной аппроксимирующей параболы (расчет П. И. Балка).

Кружки — наблюдаемые значения $\psi_j = \psi(x_j)$, $j = 1, 2, \dots, 17$; кривые с римскими цифрами — аппроксимирующие параболы φ^*I , φ^*II , φ^*III , φ^*IV с параметрами 1, 2, 3, 6 соответственно; сплошная кривая — «истинная» функция φ .

значения $\psi_j = \psi(x_j)$, полученные добавлением к значениям $\varphi(x_j)$ шумов из таблицы случайных чисел (рис. 1).

Представим себе, что парабола φ^*I порядка $L = 0$ (с одним параметром) вычислена по значениям ψ_j с помощью метода наименьших квадратов. Значения от ψ_1 до ψ_6 включительно находятся под этой параболой, а остальные (от ψ_7 до ψ_{17}) — над нею. Поэтому только одна пара значений (ψ_6, φ_7) разделена параболой, т. е. $n_v(\varphi^*I) = 1$. Значения других пар (ψ_1, φ_2) , (ψ_2, φ_3) и т. д. находятся одновременно выше или ниже параболы φ^*I . Число этих пар $n_c(\varphi^*I) = 15$. Подставим эти значения n_v и n_c в формулу (5) и получим $z(\varphi^*I) = 14/16 = 7/8$.

Аналогично вычисляются параболы φ^*II , φ^*III и т. д. Для парабол φ^*II и φ^*III имеем $z(\varphi^*II) = 1/2$, $z(\varphi^*III) = -1/4$. Для следующих парабол, включая φ^*VI , критерий z также равен $-1/4$. Далее он становится более отрицательным. Таким образом, парабола φ^*III имеет ближайшее к нулю значение критерия z , и число ее параметров является наименьшим среди других парабол с таким же значением критерия. Следовательно, парабола φ^*III является представительницей рассматриваемого класса. Можно видеть на рисунке, что функции φ^*I , φ^*II со слишком малым числом параметров не отображают большие изменения значений «истинной» функции φ . Функция же φ^*VI со слишком высоким числом параметров относительно сильно отклоняется от функции φ из-за шумов (особенно — в сторону «наблюдаемых» значений с номерами 10 и 17).

Функция φ имела формулу (которая, как упоминалось, не была известна вычислителю):

$$\varphi(x) = 3 + 2x - x^2.$$

Формула функции φ^*III , выбранной вычислительной машиной:

$$\varphi^*III(x) = 2,89 + 1,87x - 0,78x^2.$$

Смежные функции $\varphi^*II(x)$ и $\varphi^*IV(x)$ имеют формулы

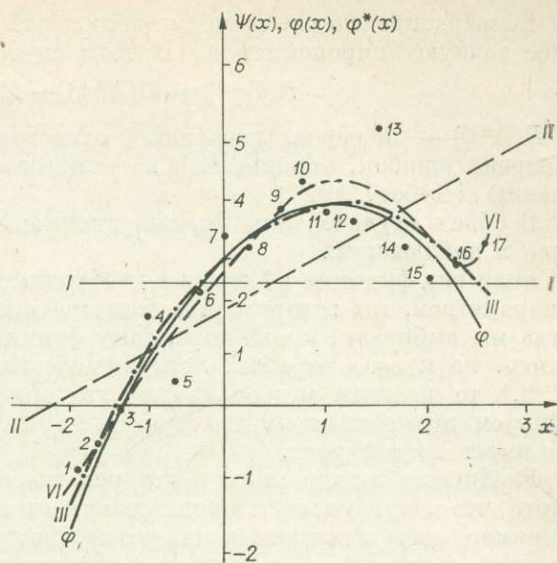
$$\varphi^*II(x) = 1,92 + 1,09x,$$

$$\varphi^*IV(x) = 2,84 + 1,95x - 0,71x^2 - 0,044x^3.$$

Очевидно, что последние две функции значительно больше отличаются своими формулами от функции φ , чем функция φ^*III . Упомянутая выше функция φ^*VI имеет еще большее отличие:

$$\varphi^*VI(x) = 2,75 + 2,64x - 0,31x^2 - 0,67x^3 - 0,16x^4 + 0,13x^5.$$

Таким образом, функция φ^*III , выбранная машиной для аппроксимации неизвестной ей функции φ , является лучшей из представленных для выбора в данном случае.



Если распределение ошибок наблюдений известно, то можно сделать более точную аппроксимацию. В этом случае мы используем критерий

$$\Delta D(\varphi^*) = D(\Delta^*\psi) - D(\Delta\psi),$$

где $D(\Delta^*\psi)$ — дисперсия значений ψ относительно функции φ^* , $D(\Delta\psi)$ — дисперсия ошибок, оцениваемая по контрольному геохимическому опробованию [Дубов, 1974].

В обоих случаях точность аппроксимации возрастает с увеличением числа n наблюдений.

Если вид функции φ^* задан и необходимо вычислить только значения ее параметров, мы говорим, что делается аппроксимация первого ранга. Когда мы выбираем, кроме того, саму функцию из заданного класса (например, из класса парабол, логарифмических парабол, функций Фурье и т. д.), то делается аппроксимация второго ранга. И наконец, когда мы выбираем также класс (и его функцию-представительницу), аппроксимация имеет третий ранг.

Различные задачи могут быть решены этим методом в зависимости от того, что подразумевается под признаками x , функцией φ и величиной ψ . Например, если признаками являются пространственные координаты точек опробования и ψ — концентрация некоторого элемента в пробах, то описанная выше аппроксимация дает фильтрацию шумов в поле концентраций и оптимальный тренд, изображающий это поле. Если признаки — концентрации совокупности элементов, легко оцениваемые в образцах горных пород экспрессным химическим анализом, а ψ — некоторое свойство горной породы или концентрация элемента, трудно оцениваемого, то мы получаем функцию регрессии, применимую для оценки такого свойства или концентрации во многих новых пробах.

АПРОКСИМАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Аппроксимация статистических распределений более сложна, поскольку здесь исходные данные (наблюденные значения) представляют собой только координаты точек в некотором признаковом пространстве, а не значения аппроксимируемой функции. И необходимо оценить функцию, отражающую плотность таких точек в различных частях пространства.

Обычно для такой цели вычисляется число точек в определенных интервалах пространства. Общеизвестно, что получаемая при этом картина зависит от выбора интервалов и отражает закон, усредненный по интервалам. Уменьшение же интервалов снижает точность расчетов.

Далее опишем метод, свободный от этих недостатков.

Предположим, мы имеем совокупность из n наблюдаемых значений x_j и требуется вычислить функцию $p^*(x)$, аппроксимирующую плотность вероятности $p(x)$, отражающую неизвестное статистическое распределение этих значений. Интервал $[\alpha; \beta]$ — область определения величины x . Эта область может быть одно- или многомерной. $\xi \in [\alpha; \beta]$ — произвольная точка области (совпадающая или не совпадающая с точками x_j).

Обозначим через $d_j = d(x_j)$ часть области $[\alpha; \beta]$, где точки ξ более близки к указанной точке x_j , чем к любой другой точке сегмента. То же самое обозначение мы будем применять для объема этой области (в двумерном случае это площадь, в одномерном — длина). Тогда $p_d(x_j) = \frac{1}{m \cdot d(x_j)}$ —

наблюденная оценка значения $p(x_j)$. Следовательно, мы можем рассчитать функцию $p^*(x)$ по значениям $p_d(x_j)$ так, как мы делали выше при вычислениях функции $\varphi^*(x)$ по значениям $\psi(x_j)$. И функция $p^*(x)$ будет аппроксимировать функцию $p(x)$ подобно тому, как функция $\varphi^*(x)$ аппрок-

симировала функцию $\varphi(x)$. Мы должны сделать лишь некоторые дополнительные замечания, учитывая особенности функции плотности вероятности.

Во-первых, значения $p_d(x_i)$ распределены приблизительно по лог-нормальному закону. Поэтому для выражения функции p^* обычно предпочтительна логарифмическая парабола. В одномерном случае это

$$p^*(x) = \exp \left(a_0 + \sum_{h=1}^L a_h x^h \right),$$

т. е.

$$\ln p^*(x) = a_0 + \sum_{h=1}^L a_h x^h.$$

Во-вторых, при вычислении критерия $z(p^*)$ необходимо иметь в виду, что шумы здесь выражаются не только в отклонениях от значений $1/(md_j)$, но также в положениях точек x_j внутри областей d_j . Поэтому критерий $z(p^*)$ при выборе функции p^* , сглаживающей шумы, должен рассчитываться, соответственно, несколько иначе. Это делается следующим образом.

Область d_j делится точкой x_j на две части: левую (d_{jl}) и правую (d_{jr}). Пусть x_{jl} и x_{jr} — центры частей d_{jl} и d_{jr} соответственно. Тогда вместо одной точки x_j со статистическим весом 1 мы можем рассматривать две точки x_{jl} и x_{jr} , с весом $1/2$ каждая. И вместо формулы (6) мы имеем для них: $p_d(x_{jl}) = \frac{1}{2m \cdot d(x_{jl})}$; $p_d(x_{jr}) = \frac{1}{2m \cdot d(x_{jr})}$.

Вычислим теперь значения $p^*(x)$ в точках $x = x_{jl}$ и $x = x_{jr}$. Число случаев, когда разность $p_d(x_{jl}) - p^*(x_{jl})$ положительна или отрицательна одновременно с разностью $p_d(x_{jr}) - p^*(x_{jr})$ для того же j , — это $n_c(p^*)$. Число случаев, когда такие разности имеют различные знаки, есть $n_v(p^*)$. И теперь мы используем критерий

$$z(p^*) = \frac{n_c(p^*) - n_v(p^*)}{n_c(p^*) + n_v(p^*)}$$

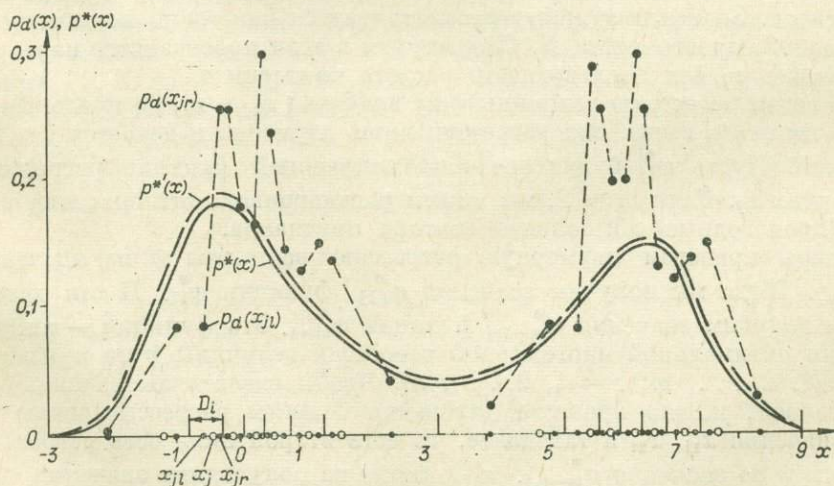


Рис. 2. Модельный пример статистического распределения (расчет Н. М. Франковской).

Аргументами являются $x_j = \lg C_j$, где C_j — концентрации Mn в единицах $10^{-3}\%$ в горных породах месторождения. Значения x_j показаны светлыми кружками вдоль оси x ; области $d_j = d(x_j)$ ограничены вертикальными штрихами на оси; значения x_{jl} и x_{jr} — черные кружки в этих областях; значения $p_d(x_{jl})$, $p_d(x_{jr})$, сравниваемые для вычисления критерия z , соединены прерывистой линией; p^* и p^* — аппроксимирующая кривая перед нормализацией и после нее соответственно.

для выбора оптимальной функции p^* подобно тому, как это было описано для функции φ^* при критерии $z(\varphi^*)$.

В-третьих, по условию нормировки для плотности вероятности должно быть справедливо равенство

$$\int_{\alpha}^{\beta} p^*(x) dx = 1. \quad (7)$$

Для упрощения вычислений функции $p^*(x)$ по значениям $pd(x_j)$ на практике обычно можно использовать метод наименьших квадратов без учета условия (7). Затем можно ввести коррекцию (нормализацию) делением полученной функции $p^*(x)$ на величину, которой оказался равен интеграл в выражении (7). При этом обычно получается результат, отличающийся от строгого решения лишь в пределах погрешностей вычислений.

На рис. 2 приведен пример. Выбранная оптимальная аппроксимирующая функция имеет здесь формулу $p^*(x) = \exp(-1,743 - 0,264x - 0,391x^2 + 0,1343x^3 - 0,0104x^4)$, где $x = \lg C$, C — изучаемая концентрация. Применялась логарифмическая трансформация в связи с применением алгоритма аппроксимации третьего ранга. Заметим, что мы никогда не получили бы такую функцию $p^*(x)$, если бы использовали только общеизвестный подход.

МНОГОМЕРНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

Как было сказано выше, многомерный анализ сталкивается с техническими трудностями из-за необходимости решать плохо обусловленную систему уравнений высокого порядка. Чтобы избежать этих трудностей, многомерная регрессия заменяется последовательностью одно- или двумерных регрессий. Ниже описывается один из разработанных вариантов. Он назван шагово-циклической регрессией.

Предположим, что мы имеем значения ψ_j для объектов r_j обучающего материала и значения вектора признаков $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$ для тех же объектов. Значения x_j могут рассматриваться как точки метрического признакового пространства X . Сформируем в этом пространстве пары соседних точек x_j для последующего расчета критерия z .

Проведем регрессию величины ψ на значения x_{1j} и x_{2j} по критерию z , как это делалось выше. Эта регрессия лишь двумерна и делается без затруднений. Пусть φ_{1j}^* будут значения полученной функции регрессии, φ_1^* в точках x_j . Если $m > 2$, мы можем рассматривать эти значения как новые (производные) компоненты вектора признаков.

Теперь проведем двумерную регрессию величины ψ на значения φ_{1j}^* и x_{3j} . Тогда мы получим значения φ_{11j}^* функции φ_{11}^* . И так далее, пока не получим значения $\varphi_{m-1,j}^*$ функции φ_{m-1}^* . Эта функция — аппроксимация оптимальной многомерной регрессии величины ψ на признаки x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$). Чтобы сделать аппроксимацию более точной, можно провести дальнейшие циклы регрессии, включая снова значения x_{1i} , x_{2i} и так далее. То есть второй цикл есть регрессия величины ψ на значения $\varphi_{m-1,j}^*$, x_{1j} , затем на полученные значения $\varphi_{m,j}^*$ и x_{2j} и так далее. Последовательность циклов повторяется, пока отклонение значений ψ_j от значений φ_j^* , полученных после цикла, продолжает снижаться. Некоторые признаки не снижают отклонения внутри цикла. Они должны быть опущены.

Решение одной практической задачи показано на рис. 3 и 4.

Ресурсы (геологические запасы) Q меди в нескольких порфировых месторождениях и площадная продуктивность ореолов различных элементов над ними были взяты в качестве обучающего материала.

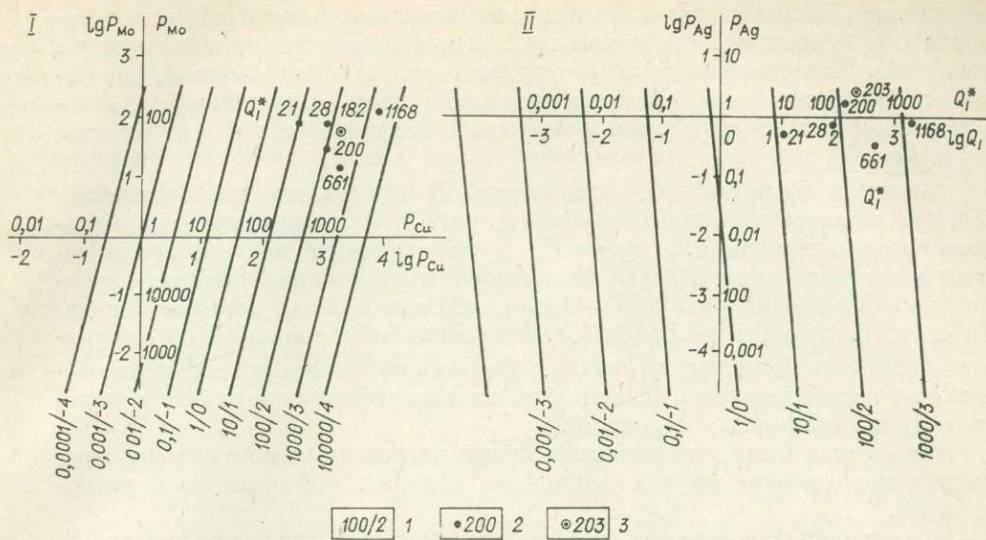


Рис. 3. Пример номограмм шагово-циклической регрессии (расчет Н. М. Франковской)

I — регрессия ресурсов меди (Q) на продуктивности ореолов меди и молибдена (P_{Cu} и P_{Mo} соответственно). Линии — полученные изолинии Q_I^* . II — регрессия ресурсов меди на значения Q_I^* и продуктивность ореолов серебра. Линии — полученные изолинии Q_{II}^* . 1 — числа на изолиниях: числитель — ресурсы руды (тыс. т), знаменатель — логарифм этого значения; 2 — объекты обучающего материала (кружки) и их действительные ресурсы (тыс. т); 3 — распознаваемый объект (двойные кружки) и значение ресурсов меди, полученное для него по номограмме (т. е. значение Q^*).

Площадная продуктивность вычислялась как интеграл аномальных концентраций по площади с определением этих концентраций так, как описано в книге [Дубов, 1974]. Поля концентраций были предварительно отфильтрованы от шумов и аппроксимированы с помощью ранговой аппроксимации, описанной выше.

На рис. 3(I) сплошные кружки имеют координаты, равные значениям продуктивностей ореолов меди и молибдена над упомянутыми месторождениями (т. е. здесь $x_{1j} = P_{Mo_j}$, $x_{2j} = P_{Cu_j}$). Около этих кружков написаны соответствующие ресурсы. Была сделана регрессия этих ресурсов на две координаты точек, и результаты представлены в виде линий равных значений функции регрессии. Регрессия была проведена по логарифмам ресурсов и продуктивностей (т. е. функция регрессии $\varphi_I = Q_I^*$

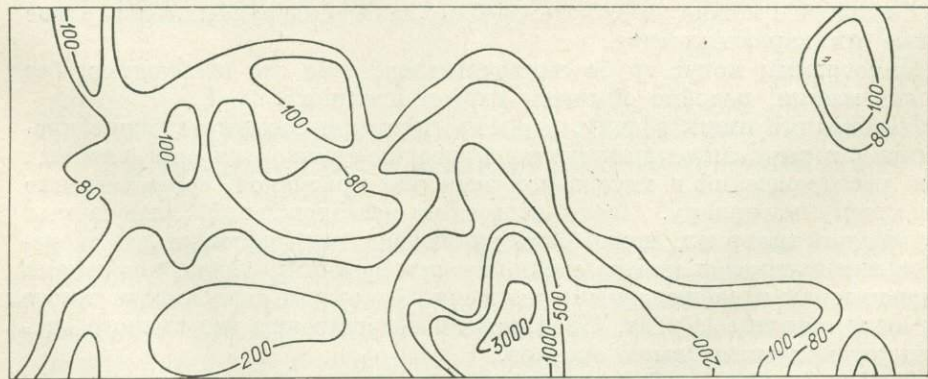


Рис. 4. Пример карты перспективности, полученной с помощью шагово-циклической регрессии (расчет Н. М. Франковской). Значения на изолиниях предполагаемых ресурсов меди надписаны в усл. ед., приходящихся на квадратный километр.

вычислялась по методу наименьших квадратов как логарифмическая парабола с аргументами, являющимися логарифмами упомянутых продуктивностей). Так было сделано потому, что оптимальная аппроксимирующая логарифмическая парабола является здесь простейшей (первого порядка) и должна быть выбрана, согласно алгоритму третьего ранга.

Значения функции Q_I^* , полученные для каждого месторождения (т. е. для каждого сплошного кружка на рис. 3, I), и значения продуктивности ореолов серебра (т. е. $x_{3j} = P_{Agj}$), наблюдаемые над соответствующими месторождениями, были использованы как координаты их точек-представительниц на рис. 3(II). Около этих точек снова показаны значения соответствующих ресурсов (Q). Регрессия этих значений на координаты точек есть функция $\Phi_{II}^* = Q_{II}^*$. Она также вычислена как логарифмическая параболическая зависимость от логарифмов координат и выражена линиями равных значений.

Аналогично были вычислены функции регрессии, использующие продуктивности ореолов других элементов, дающих информацию о ресурсах меди.

Применение полученных номограмм производится следующим образом.

Предположим, мы имеем значения продуктивностей ореолов меди, молибдена и серебра для некоторой площади, соответственно: $P_{Cu} = 1580 \text{ м}^2\%$, $P_{Mo} = 63$, $P_{Ag} = 2,2 \text{ м}^2\%$. Значения P_{Cu} и P_{Mo} , используемые как координаты, дают точку, обозначенную двойным кружком на рис. 3(I). Положение этой точки относительно линий равных значений функции Φ_I^* выражает первую оценку ресурсов меди на рассматриваемой площади: $Q_I = 182$ усл. ед. (это значение написано около упомянутой точки). Данное значение и значение P_{Ag} , упомянутое выше, используются как координаты точки, обозначенной двойным кружком на рис. 3(II). Положение этой точки относительно линий равных значений на рисунке дает значение уточненной оценки ресурсов меди на площади: $Q_{II}^* = 203$ усл. ед.

Аналогично мы можем получить более точные значения, если используем продуктивности других элементов и различные характеристики (геофизические и др.).

Подобные операции проделаны с данными, полученными для каждого квадратного километра большого региона, и рассчитаны прогнозные значения ресурсов меди. Эти значения написаны на плане, одинаковые значения соединены линиями. Полученная картина является картой перспективности региона для поисков меднопорфировых руд. Фрагмент этого плана показан на рис. 4.

Аналогично можно вычислять глубину залегания рудных тел и другие важные их характеристики.

Номограммы могут грубо вычерчиваться, если это необходимо, без счетных машин, подобно обычным картам изолиний.

Необходимо иметь в виду, что номограммы и соответствующие программы для вычислительных машин пригодны только для определенных видов месторождений и интервалов значений признаков, соответственно обучающему материалу. Число известных месторождений, включаемых в обучающий материал, может быть уменьшено, если использовать теоретические зависимости между оцениваемыми нужными характеристиками месторождений и наблюдаемыми данными. Некоторые зависимости такого рода были описаны [Дубов, 1974], но они недостаточны для полного описания рассмотренных выше ореолов.

Грубая оценка ошибок на практике показала, что описанным методом может быть правильно оценен по меньшей мере десятичный порядок рудных ресурсов.

Ради краткости мы опустили вопрос об экономических соображениях при моделировании геохимических аномалий. Почти всегда мы не можем сказать наверняка, что изучаемый объект принадлежит к одному однозначно определенному классу: обычно вероятность его принадлежности и к другим классам больше нуля. Эти классы могут быть различного экономического значения. Как выбрать стратегию в этом случае, рассматривается в работе [Математическая обработка..., 1976].

Описанный математический подход может быть использован не только для классификации и регрессионного анализа в обычном смысле. Если значения x_{ij} обозначают координаты точек отбора проб, а значения ψ_j — концентрации некоторого элемента в этих точках, то функция $\varphi^*(x)$ является поверхностью тренда, описывающей геохимическое поле. Поэтому описанный выше способ может быть использован для построения геохимических карт.

* * *

Статистические модели необходимы для современной геохимии и становятся все более важными в связи с потребностью искать месторождения на больших глубинах.

Имеется много методов для статистического моделирования. Хранить все их в памяти затруднительно. Еще более трудно выбирать необходимый метод.

Описанный метод применим во многих случаях и довольно прост в реализации. Он испытан на практике. Поэтому можно надеяться, что время, потраченное на его изучение, будет оправдано.

Практические испытания описанного метода были проведены в Центральной геохимической экспедиции Казахстана Н. М. Франковской, В. К. Кошелевым и М. С. Тонкопием при поддержке руководства экспедицией (А. Е. Ермакбаев, В. А. Досанова, Н. Н. Невинный). Н. М. Франковская принимала также участие в теоретических исследованиях, в частности, в изучении особенностей аппроксимации статистических законов, и данные ее расчетов отражены на рис. 2, 3, 4. Рис. 1 подготовлен на основе расчетов П. И. Балка, выполненных в Сибирском энергетическом институте.

*Лаборатория математических методов
исследования и рационального использования
природных ресурсов
Отдела теории систем и кибернетики
СЭИ СО АН СССР, г. Иркутск*

Б. М. ШМАКИН

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И ОЦЕНКИ ПЕГМАТИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Пегматитовые месторождения весьма разнообразны по составу и практической ценности. В настоящее время промышленный интерес представляют лишь четыре группы гранитных пегматитов: редкометальные, слюдоносные, хрусталеносные и керамические. Границы последней группы нечетки, так как источниками керамического сырья являются при комплексной разработке и редкометальные, и слюдоносные жилы. Собственно керамические пегматиты, как и хрусталеносные, пока еще почти не изучались по поводу возможности применения к их поискам и оценке

геохимических методов. Поэтому в предлагаемой вниманию читателей статье речь будет идти лишь о редкометальных и слюдоносных пегматитах. При этом мы ограничимся рассмотрением методов поисков и оценки пегматитовых тел по первичным ореолам рассеяния, а также методов оценки специализации и промышленной ценности пегматитов по составу их минералов.

Геохимические методы поисков пегматитов по гипергенным ореолам рассеяния освоены пока недостаточно, хотя исследованиями показана принципиальная возможность их использования в районах развития как редкометальных, так и слюдоносных пегматитов [Шахова, 1958; Боголюбов и др., 1970; Покровский, Ракицкий, 1971; Глебов и др., 1972]. Ограниченный объем статьи не позволяет остановиться на изложении результатов этих работ. Упомянем лишь, что методы поиска по вторичным ореолам редкометальных пегматитовых жил, выделяющихся резко повышенными концентрациями ряда редких элементов, принципиально не отличаются от методов поиска рудных тел других месторождений. Эти методы подробно освещены в современных руководствах по прикладной геохимии [Сафронов, 1971; Levinson, 1974; Поликарпочкин, 1976].

ПОИСКИ И ОЦЕНКА РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Гранитные пегматиты в настоящее время — один из источников цезия, лития, в них находятся лучшие по качеству танталовые и бериллиевые руды. При комплексном использовании редкометальных пегматитовых месторождений они дают, кроме того, значительные количества ниобия, олова, рублидия, редкоземельных элементов, а также разнообразного неметаллического сырья. Специфика этих объектов состоит в небольших размерах рудных тел и в неповторимости (уникальности) наиболее ценных месторождений. То и другое затрудняет поиски новых рудных тел. Однако накопленный за последние годы опыт работы на редкометальных пегматитах позволяет предложить их группировку для целей применения геохимических методов поисков и оценки.

Главными типами редкометальных пегматитовых месторождений являются **литиевые** (сподуменовые) пегматиты, обычно достаточно простые по минеральному составу; **танталовые** (танталитовые, воджинитовые и др.) пегматиты, характеризующиеся постоянным присутствием литиевых минералов (сподумен, монтебразит или амблигонит) и **тантал-цезиевые** (с поллуцитом, танталитом или воджинитом) пегматиты, также с обязательным присутствием литиевой минерализации. Общей геохимической чертой всех типов является концентрация лития в пегматитовых телах. К этому ведущему редкому элементу во втором типе добавляются Ta, Nb, Sn, а также в некоторых случаях Be и Rb, а в третьем типе — Cs и все остальные перечисленные элементы.

Основным приемом геохимических поисков жил редкометальных пегматитов, включая танталовые и тантал-цезиевые жилы, является так называемая **литиеметрия** площадей их развития. Уже первыми исследованиями первичных ореолов редкометальных пегматитов [Шербин, Осетров, 1961] были показаны значительные размеры геохимических аномалий лития — до 50 м от контакта. В дальнейшем были выделены литиевые ореолы отдельных жил — достаточно контрастные, с явным возрастанием концентраций по мере приближения к контактам [Загоскин, Шиманский, 1971], — и литиевые ореолы пегматитового поля в целом, не отличающиеся высокой контрастностью и превышающие фон поля всего в несколько раз [Загорский и др., 1977].

Содержания Li в первичных ореолах связаны с вхождением этого элемента в состав специфического контактового минерала — гольмквистита,

образующегося исключительно в амфиболовых породах, а также с повышенными концентрациями Li в новообразованном экзоконтактовом биотите, в перекристаллизованных биотите и роговой обманке вмещающих пород. Видимо, экзоконтактовое минералообразование осуществляется в обстановке влияния состава пегматитового тела на состав метасоматирующих растворов. Естественно связывать вынос Li (и других элементов) за пределы пегматитовой жилы с процессами замещения пегматитовых минералов: сподумена, монтебрита и других [Макагон и др., 1973].

Сравнительно недавно было обнаружено, что, кроме амфиболов и слюды, минералом-концентратором лития в ореолах редкометалльных пегматитов может быть хлорит [Загорский, 1978]. Его образование коррелируется с низкими температурами процессов альбитизации в пегматитовых танталоносных телах, окруженных зонами хлоритизации. Следовательно, и в данном случае высокие концентрации Li в ореолах обусловлены выносом этого элемента из пегматитового тела, подвергающегося замещению.

Если для собственно литиевых пегматитов ореолы Li являются прямыми индикаторами оруденения, то для танталовых и тантал-цезиевых пегматитов они индикаторы косвенные. При наличии в пегматитовом поле наряду с жилами, специализированными на тантал и (или) цезий, жил иного состава, нужны геохимические индикаторы специализации пегматитов. Кроме содержаний элементов-индикаторов в минералах самих пегматитов [Гинзбург, 1954], большое значение в этом случае могут иметь соотношения концентрации Ta, Nb, Li, Rb и Cs в ореолах [Бугаец, 1968; Макагон и др., 1976]. В большинстве изученных примеров различия пегматитовых тел разной промышленной специализации оказываются значимыми с применением одного из индикаторных отношений. В остальных примерах значимость различий достигалась с использованием двух геохимических индикаторов.

При оценке специализации пегматитов на этапе региональных поисково-съёмочных работ (ее важность усугубляется трудностью диагностики минералов и низким уровнем промышленных концентраций, особенно для танталовых пегматитов) большую помощь может оказать применение контрастных геохимических индикаторов типа Ba : Rb [Shmakin, 1978]. Колебание величины этого отношения в калиевых минералах, где и барий, и рубидий изоморфно замещают калий, достигает трех-четырёх порядков. Максимальную величину оно имеет в мусковитовых пегматитах, а минимальную — в редкометалльных. Важно отметить, что наиболее надёжно опробование начальных генераций минералов: калиевого полевого шпата графических сростаний с кварцем, биотита крупных лейст, мусковита кварц-мусковитового замещающего комплекса.

ПОИСКИ И ОЦЕНКА СЛЮДОНОСНЫХ ПЕГМАТИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Слюдоносные пегматиты являются одной из наиболее важных в практическом отношении групп гранитных пегматитов. Среди них выделяются по составу два типа: мусковитовые и редкометалльно-мусковитовые [Шмакин, 1976]. Как источник высококачественного мусковита главное значение имеет первый тип. Во втором качество мусковита ниже, а концентрации редких металлов (Be, Nb, Sn) невысоки. Тем не менее в ряде стран (Индия, Бразилия) этот тип пегматитов используется наряду с первым, причем добываются обычно как слюда, так и редкометалльные минералы (берилл, колумбит, реже касситерит).

Поскольку полезным компонентом слюдоносных пегматитов является минерал, состоящий из тех же элементов, что пегматиты и вмещающие

породы, геохимические методы поисков и оценки этих объектов должны ориентироваться исключительно на косвенные индикаторы.

Как показало изучение ореолов типичных мусковитовых пегматитов Восточной Сибири [Шмакин, Макрыгина, 1969], наиболее интересными элементами-индикаторами слюдоносных жил оказались Rb, Ba и Pb — три элемента, изоморфные с калием. В процессе послемагматического мусковитообразования в пегматитовых жилах, проходящего с замещением калиевого полевого шпата, калий и перечисленные выше элементы-примеси выносятся за пределы пегматитовых тел, фиксируясь в ореолах микроклинизации вмещающих пород. Размеры ореолов измеряются десятками метров от контактов жил. Контрастность аномалий невелика (2—3 раза), но вполне достаточна для уверенного обнаружения ореолов.

Так, уже на начальном этапе опытно-промышленной проверки рекомендованных нами методов в слюдоносном районе были обнаружены первичные ореолы «слепых» пегматитовых жил [Куфтырева, Соловарова, 1966]. Последующая проверка аномалий буровыми скважинами показала наличие на глубине слюдоносных зон с промышленными содержаниями мусковита.

Кроме калишпатсодержащих мусковитовых пегматитов в Восточной Сибири, а также и в других слюдоносных районах мира, распространены жилы, состоящие из плагиоклаза, кварца и мусковита, содержащие также некоторые акцессорные минералы: турмалин, берилл, сульфиды. Это так называемые «мусковит-плагиоклазовые жилы», первичные ореолы которых меньше по размерам, чем ореолы калишпатсодержащих жил, и лишены зоны микроклинизации. Здесь наибольший интерес для поисковых целей представляют участки мусковитизации вмещающих пород, выделяющиеся четкими положительными аномалиями Li, Cs, Be, V и отрицательными аномалиями Ca, Mg и элементов группы железа. Аналогичную геохимическую характеристику имеют и зоны мусковитизации, сопряженные с зонами микроклинизации вокруг калишпатсодержащих пегматитовых тел. В результате литий оказывается иногда хорошим элементом-индикатором [Татарский, 1975] и в применении к слюдоносным пегматитам.

Естественно, что первичные ореолы слюдоносных жил могут свидетельствовать лишь о наличии мусковита в пегматитах, не неся информации о качестве слюды [Боголюбов и др., 1970]. В этом состоит главная трудность применения геохимических методов к поиску месторождений неметаллических полезных ископаемых вообще. Некоторую помощь оказывает изучение минералов в измененных породах ореолов. Так, количество «секущего» мусковита в ореольных зонах мусковитизации (мусковита по полевым шпатам) коррелируется с содержанием промышленного мусковита в пегматитовых телах. Поэтому желательно, чтобы изучение ореолов при поисках слепых слюдоносных тел было комплексным, петрографо-геохимическим [Shmakin e. a., 1971].

Изучение экзоконтактов пегматитовых тел имеет большое значение при оценке продуктивности слюдоносных жил с неравномерным распределением мусковита. Пересечение разведочной скважиной «пустого» пегматитового тела вызывает необходимость принятия решения об отнесении такого тела к слюдоносным или бесслюдным. Геохимическое и (или) петрографическое изучение пород в экзоконтактах жил позволяет сделать вполне обоснованный вывод о том, прошли ли в пегматитах процессы мусковитизации.

Наконец, как уже упоминалось, оценка мусковитовой специализации пегматитов может быть сделана по максимальным величинам отношения Ba : Rb в начальных поколениях калиевых минералов.

О ПРОИСХОЖДЕНИИ ОРЕОЛОВ ПЕГМАТИТОВЫХ ТЕЛ

Для обоснования геохимических методов поисков пегматитовых тел — как по прямым, так и по косвенным индикаторам — весьма важно установление источника элементов, образующих геохимические аномалии. Выше мы уже упоминали, что положительные аномалии щелочных и близких им элементов (например, Ва и Pb) вокруг пегматитовых жил создаются в процессе замещения пегматитового вещества. Именно это обстоятельство позволяет использовать аномальные концентрации вынесенных элементов в первичных ореолах в качестве надежного инструмента поиска источника элементов — пегматитовой жилы.

Известно, что рудоносными редкометальными телами являются тела так называемых **замещенных пегматитов**, т. е. пегматитов, подвергшихся после их первоначальной консолидации процессам альбитизации, лепидолитизации и другим процессам замещения первичных минералов вторичными. Именно в зонах замещения пегматитов находятся повышенные содержания многих минералов Ta, Nb, Sn, Be. А в сопряженных с ними по времени зонах изменения вмещающих пород — аномальные концентрации вынесенных из участков альбитизации K, Li, Rb, Cs. Таким образом, процессы замещения пегматитов являются в данном случае причиной образования ореолов.

Высокие концентрации Li и Cs (частично Be) в редкометальных пегматитах обычно первичны, поэтому в сподуменовых или поллцитовых пегматитовых телах процессы замещения не будут необходимым условием образования руд. Однако и эти тела в той или иной степени подвержены альбитизации и другим метасоматическим изменениям, поскольку расплавы, давшие начало редкометальным пегматитам, были обогащены как редкими металлами, так и летучими компонентами. Явления замещения в редкометальных пегматитовых жилах имеют, как правило, автометасоматический характер, т. е. происходят при воздействии магматического остатка в пределах пегматитовой камеры. Вследствие этого они протекают в любом пегматитовом теле, неизбежно сопровождаясь выносом части элементов в окружающие породы. Как показывает изучение ореолов литиевых и тантал-цезиевых пегматитов, во всех случаях ореолы жил оказываются достаточно крупными и контрастными для их использования в поисковых целях.

В редкометально-мусковитовых пегматитах процессы замещения (мусковитизации, альбитизации, кварцевого замещения) тоже имеют автометасоматическую природу. Как и в случае редкометальных пегматитов, они приводят к выносу во вмещающие породы части компонентов замещаемых минералов: щелочных элементов, иногда Be, Sn, Nb. Ореолы жил редкометально-мусковитовых пегматитов, хотя и невелики по размерам, отличаются достаточной контрастностью.

В инъекционных телах собственно мусковитовых пегматитов процессы послемагматического метасоматоза — наложенные [Шмакин, 1976]. Они вызываются растворами, внешними по отношению к данному объему пегматитового тела, но родственными ему по общему источнику (пегматитоносные граниты). Зоны мусковитизации в таких пегматитовых телах расположены незакономерно, будучи приурочены то к контактам, то к секущим трещинам, то к осевой части. Однако во всех случаях процессы мусковитизации калиевого полевого шпата приводят к переходу значительных количеств калия и сопутствующих ему элементов (Ba, Rb, Pb, Cs) в раствор и выносу их за пределы слюдоносных зон. Поэтому наличие положительных аномалий этих и других элементов в ореолах является надежным поисковым признаком наличия зон мусковитизации в пегматитовых телах.

Ореолы мусковит-плаггиоклазовых жил образуются одновременно с самими жилами примерно так же, как возникают ореолы рудных жил гидро-

термальных месторождений — вследствие миграции компонентов раствора в направлении понижения их концентраций. Возможность их использования с поисковыми целями тоже не вызывает сомнений.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ОРЕОЛОВ

В применении к ореолам пегматитовых тел различной специализации обычные приемы их изучения и использования, сложившиеся при исследовании гидротермальных рудных месторождений, нередко оказываются недостаточными или неточными. Преобладание косвенных геохимических индикаторов, зависимость концентрации элементов в ореолах от минеральной формы их вхождения, многоэтапность процессов образования ореолов — эти и другие факторы заставляют проводить комплексное минералого-петрографическое и геохимическое изучение пегматитовых полей.

А. Е. Ферсман (1953) совершенно справедливо указывал на необходимость всестороннего изучения месторождений полезных ископаемых для поисковых целей. Приведем один пример по ореолам редкометалльных пегматитов. В амфиболсодержащих вмещающих породах выносимый из пегматитового тела литий фиксируется обычно в виде гольмквистита — литиевого амфибола. Если же наряду с такими породами вокруг пегматитового тела есть и биотитовые сланцы или гнейсы, литий фиксируется в перекристаллизованной или новообразованной слюде, на этот раз уже вместе с Rb и Cs. Достаточно применить к такому ореолу методику мультипликации щелочей [Виноградова и др., 1971], и будут получены ложные аномалии, обусловленные не более интенсивным привнесом элементов, а иным минеральным составом вмещающих пород.

Другой пример — по ореолам мусковитовых пегматитов. Вынос калия из калишпатсодержащих пегматитовых тел, подвергающихся мусковитизации, обычно приводит к микроклинизации окружающих пород. Однако при высокой глиноземистости пород (содержащих, например, обильный дистен) вместо микроклина образуется мусковит, концентрирующий меньше Ba и Pb, но больше Rb, Cs и особенно Li, чем калишпат. Без учета особенностей среды и минерального состава ореолов можно было бы получить ложные данные об изменении состава пегматитов участка.

Выше уже упоминалось о формировании хлорита в ореолах танталовых пегматитов. Этот минерал, не имеющий в своем составе калия, как и гольмквистит, почти не содержит Rb и Cs, но может концентрировать значительные количества Li, замещающего Mg. По хлоритизированным породам вполне может быть проведена литиеметрия. Но при попытке выделения на фоне литиевых ореолов более локальных ореолов жил по Rb и Cs мы столкнулись бы с непреодолимыми затруднениями, сущность которых невозможно понять без минералого-петрографического изучения пород.

Приведенных примеров, по видимому, достаточно для того, чтобы показать необходимость тщательного изучения особенностей неизмененных пород, вмещающих пегматитовые тела, и новообразованных пород ореолов. Разумеется нельзя требовать, чтобы при поисковых работах детальные минералогические и петрографические исследования выполнялись во всех случаях. Но на этапе изучения модельных объектов и разработки методики поисков таких сложных месторождений, как пегматитовые, знание процессов миграции элементов и их концентрирования в тех или иных минералах необходимо.

Попытки применения геохимических методов поисков и оценки месторождений без знания существа процессов их образования и изменения могут привести лишь к дискредитации предлагаемых методов. Накопленный к настоящему времени теоретический и практический багаж сведений о

генезисе пегматитов и их ореолов, об особенностях строения и состава полей аномальных концентраций позволяет обосновать применение геохимических методов на всех известных типах гранитных пегматитов.

*Институт геохимии
им. А. П. Виноградова СО АН СССР, г. Иркутск*

В. Д. КОЗЛОВ

ОЦЕНКА РУДОНОСНОСТИ ГРАНИТОИДНЫХ МАССИВОВ

Общие положения о связи эндогенной рудной минерализации с магматизмом и решающей роли летучих компонентов-минерализаторов в формировании исходных магматических расплавов гранитоидных интрузий и сопровождающего их оруденения были сформулированы еще в середине прошлого столетия [Романова, 1977]. С тех пор усилия в разработке вопросов рудоносности магматитов были направлены на выявление конкретных признаков связи магматизма и оруденения и замену качественных представлений и критериев количественными.

Наряду с преобладающими собственно геологическими методами (геолого-структурными, минералого-петрографическими, минералогическими) для решения этих вопросов, с начала нашего столетия широко привлекаются петрологические (петрохимические), а затем экспериментальные данные.

Несмотря на известную пестроту взглядов, положение о непосредственной связи магматизма и эндогенного оруденения всегда оставалось доминирующим. Совершенно однозначно оно сформулировано в высказывании П. Ниггли (1933): «Проблема рудных месторождений есть лишь часть общей проблемы, касающейся дифференциации магмы в самом широком смысле» (цитируется по М. М. Романовой, 1977, с. 105). К этому же времени относится разработка У. Эммонсом теоретической схемы зональности оруденения вокруг гранитных «батолитов».

Однако, несмотря на общность теоретических представлений, практические успехи в выявлении критериев рудоносности гранитоидных массивов в течение всего рассматриваемого периода были весьма скромными. Хотя не ощущалось недостатка в предлагаемых критериях и признаках рудоносности, большинство из них страдало отсутствием конкретности и нередко носило, как подчеркивает Л. Н. Овчинников (1975), частный характер.

Представляется, что наиболее общими, давно установленными признаками, обычно свойственными рудоносным гранитоидным интрузиям, являются гипабиссальность, кислый и лейкократовый характер гранитов, их дифференцированность, аксессуарный состав. Как было показано [Козлов, 1977], все эти признаки, за исключением последнего, лишь необходимы, но недостаточны для выделения рудоносных интрузий среди многочисленных, им подобных гранитных массивов, не сопровождающихся оруденением. Так, детальное изучение рудоносных комплексов Забайкалья показало, что среди типичных гипабиссальных интрузий сходного состава даже в одном регионе могут быть и рудоносные массивы, и безрудные [Свадковская, 1974]. Дифференцированность — характерная черта подавляющего большинства гранитоидных систем независимо от степени их рудоносности. Лейкократовый состав обычно характерен для гранитных массивов, сопровождающихся редкометальным, в том числе оловянно-вольфрамовым, молибденовым оруденением. Вместе с тем в ряде регионов известны целые комплексы, представленные преимущественно массивами лейкогранитного состава, которые оруденением практически

не сопровождаются. В качестве примера могут быть названы баргузинский и витимканский комплексы протерозойского и нижнепалеозойского возраста, формирующие крупнейший Ангаро-Витимский батолит Западно-Забайкальского региона [Литвиновский, Занвилевич, 1972].

Наиболее универсален из перечисленных признаков специфический акцессорный состав рудоносных массивов, который следует относить к разряду минералого-геохимических (см. ниже).

В пятидесятые годы, благодаря резкому техническому прогрессу в области аналитики минеральных веществ, начинается интенсивная разработка геохимических критериев рудоносности. Достигнутые в этом направлении результаты позволяют полагать, что на основе сочетания геологических, петрохимических и собственно геохимических критериев могут быть сформулированы не только необходимые, но и достаточные признаки распознавания рудоносных (потенциально рудоносных) гранитоидных интрузий.

Положения о том, что рудоносные массивы должны обладать собственными только им особенностями, высказывались достаточно давно. С. С. Смирнов (1944), обсуждая причины формирования выделенных им металлогенических поясов Забайкалья, писал, что «условия развития интрузий оловянно-вольфрамового пояса и их изначальный характер обусловили такой специфический состав рудоносных растворов, что последние могли создать лишь определенную... серию рудных проявлений...» и «представляется вероятным, что выделенные выше типовые рудные серии отдельных поясов отвечают типовым, так сказать, интрузиям» (с. 79—81). Забегая вперед, следует подчеркнуть, что эти предположения С. С. Смирнова полностью подтвердились прежде всего в петролого-геохимическом отношении [Козлов, Свадковская, 1977; Козлов и др., 1975].

Распространено в геологической литературе мнение о том, что оруденение может быть следствием как повышенного уровня содержаний рудных элементов в магматических телах, так и пониженных концентраций, возникающих в участках магматических тел в результате сброса ими рудных компонентов с рудоносными постмагматическими флюидами. Очень долгое время неясным оставался вопрос о том, насколько повышенными (или пониженными) могут быть концентрации соответствующих элементов. Совершенно очевидно, что без установления кларковых, среднемировых концентраций, оценить уровень изменения содержаний элементов в рудоносных массивах было бы вообще невозможно. Долгое время считалось, что концентрации профилирующих, формирующих оруденение элементов, по крайней мере в части рудоносных массивов и комплексах, резко повышены — превышают средние, кларковые содержания в десятки — сотни раз. Этому способствовало не критическое использование широко применявшегося на первых этапах внедрения геохимических методов в геологическую практику результатов приближенно-количественного спектрального анализа, со значительной и зачастую не оцененной ошибкой аналитических определений. Действительный уровень концентраций элементов в гранитоидах был оценен в работах Л. В. Таусона (1964, 1964), показавшего, что в гранитах рудоносных интрузий содержания профилирующих элементов хотя и повышены, но повышение весьма умеренно и превышает кларковый уровень в большинстве случаев всего в 1,5—4 раза. Это положение было подтверждено в более поздних публикациях [Беус, Ситни, 1967; Таусон и др., 1970; Козлов, Свадковская, 1977]. Что же касается предположения о возможном понижении концентраций элементов в магматических телах в результате их сброса с рудоформирующими растворами, то следует со всей определенностью подчеркнуть, что автору не известно ни одного примера рудоносных интрузий гранитоидного ряда, в которых наблюдалось бы понижение концентраций профилирующих рудных элементов относительно кларкового уровня. Напротив, чем выше степень повышения концентраций редких

и рудных элементов в гранитоидных телах, тем выше, при прочих равных условиях, их реальная рудоносность [Козлов, Свадковская, 1977; Козлов, 1977].

Долгое время неясным оставался также вопрос — концентрирование каких именно элементов следует ожидать в рудоносных интрузиях. Первоначально он решался прямолинейно — в гранитоидах анализировалось распределение содержаний тех главных рудных элементов, которые формировали профилирующее в районе оруденение. В ряде случаев, главным образом для группы халькофильных элементов, положительных результатов не было получено, геохимических связей магматитов и оруденения не устанавливалось.

Впервые детально и на статистической основе этот вопрос был рассмотрен В. Л. Барсуковым (1964), показавшим, что для одних элементов связь оруденения с магматизмом отчетлива и проявляется в повышении концентрации элементов в гранитах (Sn), для других — связи не устанавливается (полиметаллы), для третьих — выводы неопределенны (Mo).

В настоящее время этот вопрос в общем виде решается вполне однозначно. В таблице кларковых концентраций К. Таркяна и К. Ведеполя [Turekian, Wedepohl, 1961] приведены средние содержания (%) отдельно для гранитоидов, богатых и бедных кальцием. Первые соответствуют по составу среднему гранодиориту по Р. Дэли (67,5 — SiO₂; 3,85 — Na₂O; 3,00 — K₂O), вторые — лейкогранитам — аляскитам (75 — SiO₂; 3,65 — Na₂O; 5 — K₂O). Если, используя данные таблицы, проанализировать степень концентрирования элементов в лейкогранитах по отношению к гранодиоритам, то оказывается, что все элементы подразделяются на две большие группы: элементы, накапливающиеся в лейкогранитах, и элементы, концентрации которых в них понижаются. Для небольшой части элементов различий в концентрациях между гранодиоритами и лейкогранитами не устанавливается.

По степени концентрации в лейкогранитах элементы образуют следующий ряд (цифры отвечают отношению концентраций в лейкогранитах к концентрациям в гранодиоритах): 2 — Sn, Th; 1,8—1,5 — P, F, Cl, K, Li, Rb, Be, W, Hf, 1,3 — Mo, Pb; 1,2—1,1 — B, Zr, Ta, Nb. Приведенный ряд почти без исключений соответствует понятию «гранитофильные элементы», которые концентрируются в гранитоидах. Одновременно, этот ряд представляет элементы, формирующие эндогенное пневматолито-гидротермальное оруденение, для которого связь с конкретными гранитными интрузиями сомнения не вызывает, хотя следует заметить, что в разных регионах (или для отдельных интрузий) профилирующими в оруденении могут выступать либо одна, либо другая группа элементов этого ряда в разных сочетаниях (Sn — W; W — Sn; W — Mo; Li — Sn; Sn — полиметаллы и т. д.). Рассматриваемая группа объединяет в основном рудные и редкие элементы с литофильными свойствами, характеризующимися относительно небольшими миграционными способностями. Благодаря этому, оруденение размещается либо в эндоконтактной (обычно грейзеновое), либо в экзоконтактной (гидротермальное) зоне, не удаляясь от кровли интрузий более чем на 1—1,5 км [Невский, Сморчков, 1970].

Как видно, среди рассматриваемых элементов совершенно отсутствуют типичные халькофильные (а также сидерофильные). Это полностью согласуется с выводами целого ряда исследователей относительно отсутствия прямых геохимических индикаторов связи типичных сульфидных гидротермальных месторождений с гранитоидами, в том числе и для большинства полиметаллических месторождений. Известно, что свинец обладает и лито-, и халькофильными свойствами, и его присутствие в ряду гранитофильных элементов закономерно: во многих оловорудных узлах полиметаллическое оруденение проявлено интенсивно. Но главная часть промышленного свинца концентрируется в собственно полиметаллическом

Геохимическая характеристика типичных редкоре

Регион	Возраст	Комплексе	Массив	Фаза	Порода
Забайкалье	T—I ₂	Кыринский	Ульзутуйский Гыр-Голунский	Главная	Гранодиориты и граниты
				Дополнит. интрузий	Биотитовые граниты и лейкограниты
	I ₂ —I ₃	Кукульбейский		То же	Лейкограниты
				Главная	Биотитовые граниты
Центр. Европа, Рудные горы	I ₂ —I ₃	Харалгинский	Шерловгорский	Главная	Граниты биотитовые
				Мусковитовых гранитов	Граниты мусковитовые
	I ₂ —I ₃	Харалгинский	Тургинский	Субфаза	Граниты мусковитовые, пегматитоносные
				Главная	Граниты биотитовые
C—P	Рудогорский	Ингодипский массив апофиза	Заключит. фаза	Кварцевые порфиры	
			Главная	Граниты амазонитовые	
Центр. Европа, Западные Карпаты	K(?)	Гемеридный	Карловарский	То же	Граниты лейкократовые
				Главная	Кварцевые порфиры
Юго-западная Англия, Корнуэлл	C—P	Корнубийский	Гнилецкий	Субфаза	Граниты амазонитовые
				Главная	Граниты лейкократовые
Тасмания	D ₃		Клигга Хэд	Лэндс Энд	Граниты лейкократовые двуслюдяные
				Каримеллис	То же
				Блу Ти	Граниты биотитовые
				Дополнит. интрузий	Граниты биотитовые

Примечание. Цифры последней графы: 1 — Козлов, Свядковская, 1977; 2 — Сегалеку, Абыолопова, 1974; 6 — Таусон и др., 1976; 7 — Hall, 1971; 8 — Groves, 1972.

гально-рудоносных гранитоидов разных регионов

Рудоносность	Содержание элементов												Число проб	Лит. источник
	%			г/т										
	Na	K	F	Li	Rb	Be	Sr	Ba	B	Sn	W	Pb		
Безрудные, частично ограничено рудоносные	2,9	3,2	0,05	56	130	2,5	220	700	16	5,2	1,0	23	146	1
Безрудные и ограничено рудоносные	2,8	3,9	0,03	42	185	3,3	50	310	16	5,2	1,3	28	147	
Ограничено рудоносные	2,8	4,0	0,02	34	270	4,0	20	30	26	9,8	4,9	24	15	
То же	2,7	3,7	0,04	64	180	4,1	70	270	24	7,5	1,2	35	17	
»	2,7	3,6	0,10	120	300	7,0	180	450	35	10,0	5,8	38	50	
Рудоносные	2,7	3,6	0,20	200	420	14,0	80	120	38	40	11	24	30	
»	3,2	3,1	0,05	80	330	10	15	60	29	20	3,5	22	47	
»	2,4	4,45	0,50	110	440	8	30	90	55	7	4,8	20	9	2
Интенсивно рудоносные	3,4	3,65	0,58	200	600	11,6	40	70	110	50	7,2	52	7	3
Рудоносные	2,8	3,2	0,20	200	670	5,1	10	50	12	13	2,0	80	5	1
Рудоносные	2,8	4,1	0,28	72	360	8,5	90	260	17	9,7	3,7	31	128	
»	2,1	4,9	0,90	490	480	2,6	170	480	18	11	4,5	60	7	1
Интенсивно рудоносные	2,6	3,8	0,56	410	900	10	23	90	32	23	11,3	20	48	4
Те же	2,6	3,8	0,70	600	1200	11	25	75	42	42	11,4	18	54	
Рудоносные	2,1	3,8	0,34	325	645	14	27	71		35				5
Ограничено рудоносные	2,2	3,6	0,08	45	260	2,7	50	300	35	19	3,3	24	7	
Рудоносные	2,6	3,5	0,26	220	530	5,0	30	60	340	34	8	10	15	
Интенсивно рудоносные	2,4	4,15	0,38	480	700	Нет данных	175	150	840	40	30	35	2	7
Те же	2,0	4,7	0,15	510		Нет данных			500		Нет данных			
»	2,2	4,1	0,10	700		То же			590	23	Нет данных			
Ограничено рудоносные	2,2	3,9	0,14	95	360	Нет данных	75	Нет данных	9	Нет данных			5	8
Рудоносные	2,4	3,8	1,00	380	1000	То же	6	То же	50	То же			6	

вич, 1976; 3 — данные автора по пробам Ю. П. Трещина; 4 — Large e. a., 1976; 5 — Klotz

сульфидном оруденении, для которого прямые геохимические связи с гранитоидами, как правило, не устанавливаются. Показательно также, что в рассматриваемой группе элементов присутствуют летучие — F, Cl, P, в меньшей мере В. Ведущая роль фтора в формировании связанного с гранитами эндогенного олово-вольфрам-редкометального оруденения установлена непосредственными геохимическими исследованиями и неоднократно подчеркивалась [Таусон и др., 1968, 1970].

Таким образом, на основе анализа статистически обоснованных кларковых концентраций, которые отвечают понятию усредненных результатов множества наблюдений [Овчинников, 1975], однозначно выявляется группа химических элементов, концентрирующихся в лейкогранитных образованиях и формирующих эндогенное оруденение, генетические связи которого с гранитоидами наиболее очевидны.

Точно так же из сопоставления уровней концентраций элементов в гранодиоритах и сиенитах, по данным К. Таркяна и К. Ведеполя [Turekian, Wedepohl, 1961], выявляется группа редких элементов, концентрирующихся в щелочных и субщелочных гранитоидных породах (сиенитах и щелочных гранитах): 5—3 — Hf, Ba, Zr; 2 — TR, Nb. Как видно, эта группа включает именно те элементы, которые формируют высокотемпературную эндогенную минерализацию, (редкометально-редкоземельную), связанную с интрузиями щелочных и субщелочных гранитоидов.

Очевидно, средние концентрации элементов были вычислены по исходным материалам, включавшим данные как по безрудным, так и по рудоносным гранитам. Поскольку безрудные интрузии численно преобладают, можно утверждать, что вычисленные К. Таркяном и К. Ведеполем средние концентрации более отвечают содержаниям в безрудных разновидностях лейкогранитов (граниты, бедные кальцием) и поэтому могут служить основой для оценки степени концентрации элементов в гранитоидах отдельных рудоносных интрузий. Подробное изучение интрузий гранитоидов оловянно-вольфрамового пояса Забайкалья показало, что отдельные в разной степени рудоносные массивы значительно различаются уровнями концентрации элементов (здесь и в дальнейшем имеются в виду прежде всего данные по наиболее распространенным биотитовым гранитам главных интрузивных фаз массивов).

Это положение иллюстрируется приведенными в табл. 1 средними данными по гранитам рудоносных комплексов (и их отдельных массивов) Забайкалья [Козлов, Свадковская, 1977], Центральной Европы [Lange, e. a., 1972; Klominsky, Absolonova, 1974; Зоубек и др., 1977], Англии [Hall, 1971, 1973], Австралии — Тасмании [Groves, 1972]. Из табл. 1 отчетливо видно, что наиболее рудоносные граниты Центральной Европы и Англии характеризуются чрезвычайно высокими концентрациями фтора, бора, редких щелочей, олова, вольфрама. Интенсивно рудоносные граниты Южной Англии — Корнуэлла выделяются экстремально высокими концентрациями бора, сочетающимися с высокими содержаниями фтора, редких щелочей, олова. Как известно, с сателлитовым куполом Карн Бри массива Карменеллис, частичные данные по гранитам которого приводятся, ассоциирует крупнейшее, ныне отработанное месторождение Долкоатс, являющееся частью рудного района, общая добыча которого оценивается в 1 млн. т олова [Лугов и др., 1976]. Несмотря на однозначность вывода о существенно повышенных концентрациях группы гранитофильных элементов в редкометально-рудоносных гранитах, оценка степени повышения концентраций по данным таблиц, подобных табл. 1, затруднительна вследствие неравномерности повышения и большого числа элементов, которые должны рассматриваться.

Результаты подробного геохимического сопоставления на статистической основе рудоносных и безрудных массивов Центрального Забайкалья [Козлов, Свадковская, 1977] могут быть сведены к очень простой диаграмме (рис. 1). По принятой в названной работе терминологии, основанной на

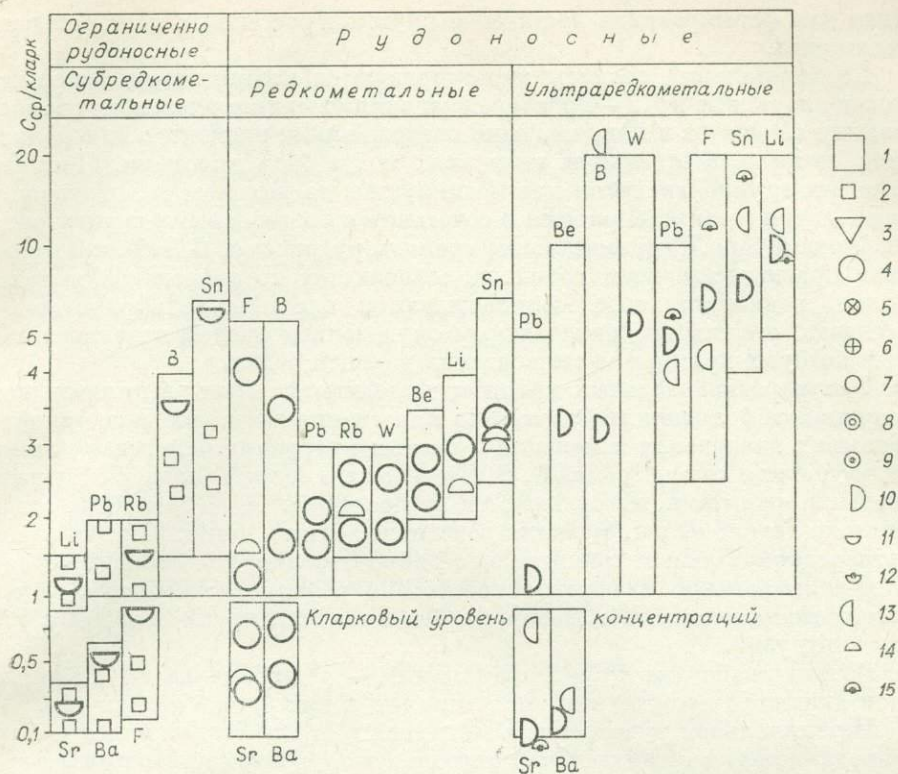


Рис. 1. Диаграмма диапазонов относительных концентраций редких элементов в гранитах интрузий, различающихся по степени рудоносности. Условные знаки на диаграмме иллюстрируют уровни концентраций элементов в гранитах некоторых конкретных рудоносных комплексов и в отдельных массивах (по данным табл. 1).

1—9 — гранитоиды оловянно-вольфрамового пояса Забайкалья: 1—2 — кыринский батолитовый комплекс (1 — граниты, гранодиориты главной фазы, 2 — биотитовые и лейкократовые граниты фазы дополнительных интрузий), 3 — шахтаминский комплекс гипабиссальных интрузий (монзониты; монцодиориты главной фазы), 4—9 — кукельбейский и харалгинский комплексы гипабиссальных редкометалльных интрузий (4 — биотитовые и лейкократовые граниты главной фазы, 5 — гранодиориты гибридных фаций, 6 — амазонитовые граниты заключительной фазы, 7 — гранит-порфиры, кварцевые порфиры заключительной фазы, 8 — мусковитовые граниты субфазы пегматитоносных гранитов, 9 — мусковитовые граниты грейсенизированных куполов); 10 — Рудные горы Центральной Европы, биотитовые и лейкократовые граниты главной фазы; 11, 12 — темеридный комплекс Западных Карпат (11 — биотитовые граниты главной фазы, 12 — мусковитовые граниты купольной субфазы); 13 — корнубийский комплекс Корнуолла, Южная Англия, лейкограниты главной фазы; 14, 15 — Блу Ти батолит Тасмании (14 — адамеллиты главной фазы, 15 — двуслюдяные мелкосреднезернистые граниты фазы дополнительных интрузий). Жирным контуром показаны условные значки средних по комплексам и группам массивов, тонким контуром — точки отдельных массивов (по табл. 1 и цитируемым в ней работам).

оценке степени концентрации редких элементов, выделяются субредкометалльные, редкометалльные и ультраредкометалльные граниты. Субредкометалльные граниты характеризуются заметным (до 2—3 кларков) накоплением только части гранитофильных элементов (Sn, Rb, иногда W). Как видно из диаграммы, содержания фтора в них обычно понижены, либо не превышают кларковского уровня. Ранее было показано, что интрузии лейкогранитов с подобной геохимической характеристикой ограничены рудоносны. Это выражается в том, что они могут сопровождаться лишь малоинтенсивным оловянным или оловянно-вольфрамовым пневматолито-гидротермальным оруденением с бедным минеральным составом, в котором практически отсутствуют минералы фтора и собственно редкометалльной ассоциации (т. е. минералы лития, бериллия, тантала, ниобия); состав сульфидных минералов также беден. Нередко многочисленные рудопроявления представляют тем не менее в основном минералогический интерес, запасы их невелики, но в благоприятных условиях они могут быть источ-

ником для формирования достаточно крупных россыпных месторождений касситерита.

Редкометалльные граниты характеризуются повышенными (превышающими кларковые в 1,5—4 раза) содержаниями практически всех гранитофильных элементов и повышенными содержаниями элементов-минерализаторов, которые в отдельных интрузиях могут быть высокими. Наиболее легко эта группа гранитов диагностируется по высоким концентрациям олова, лития (цезия), бериллия в сочетании с повышенными концентрациями фтора и бора. Редкометалльные граниты рудоносны. В Забайкалье интрузии практически всех гранитов, отвечающих по элементной характеристике редкометалльным, сопровождаются оловянно-вольфрамовым, и в меньшей степени, редкометалльным оруденением разной интенсивности, среди которых крупные месторождения в общем редки.

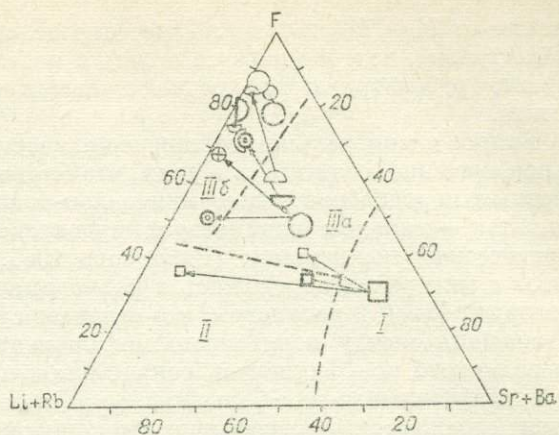
Ультраредкометалльные граниты выделяются очень высокими концентрациями большинства элементов при значительном их непостоянстве и больших диапазонах изменения в разных интрузиях. Благодаря этому, они по уровням концентраций F, В, Ве, W могут сопоставляться с редкометалльными гранитами, но отличаются от последних более высокими содержаниями лития, олова, рубидия, очевидно, также цезия. С интрузиями ультраредкометалльных гранитов постоянно ассоциирует оловянное, оловянно-вольфрамовое и нередко собственно редкометалльное оруденение, интенсивность и масштабы которого, без сомнения, прямо связаны с объемом интрузий.

Общим свойством субредкометалльных — редкометалльных лейкогранитов являются пониженные концентрации в них бария и стронция.

Потенциальная рудоносность интрузий в отношении оловянно-вольфрамо-редкометалльного оруденения определяется уровнем накопления в гранитах не одного профилирующего, а всей группы тесно связанных общностью поведения летучих и гранитофильных элементов. Сравнительный уровень концентрации профилирующих элементов оруденения (например, вольфрама) в гранитах может быть относительно невысок. Гораздо более важным выступает фактор общего уровня накопления всей группы летучих и редких элементов в гранитной системе, особенно фтора, лития, олова. Следует отметить, что перечень включенных в диаграмму элементов заведомо сужен. Очевидно, полезными были бы данные по цезию, танталу, ниобию. Но главная закономерность уже ясна и сводится к весьма простой формуле — чем выше в гранитной системе уровень накопления всей группы гранитофильных элементов, тем выше ее рудоносность. Автору представляется, что основное значение диаграммы заключается в возможности количественной оценки уровней концентраций элементов, благодаря чему она приобретает значение геохимического теста, с помощью которого анализ степени рудоносности гранитного массива будет тем более точным, чем точнее установлены средние концентрации и чем шире круг анализированных гранитофильных элементов. Требование точности удовлетворяется, с одной стороны, невысокой ошибкой анализа (20%), с другой — статистическим обоснованием средних концентраций [Овчинников, 1975].

Очевидного неудобства оценки рудоносности по многим параметрам можно отчасти избежать с помощью предложенной автором ранее тройной диаграммы рудоносности (рис. 2), в которой использованы наиболее контрастные редкие элементы из числа рассмотренных: F; Li + Rb; Sr + Ba. Фтор выбран как ведущий элемент-минерализатор, уровень концентрации которого прямо связан с рудоносностью; степень концентрации в гранитах редких щелочей, особенно лития, в целом пропорциональна концентрации рудных элементов, особенно олова (см. рис. 1); содержания бария и стронция, в отличие от безрудных, в рудоносных гранитоидах понижены. Было показано [Козлов, 1974; Козлов, Свядковская, 1977], что с помощью диаграммы по геохимическим признакам, в сочетании с геологическими данными, гранитоидные интрузии могут быть подразделены на безрудные,

Рис. 2. Тройная диаграмма сравнительной потенциальной рудоносности интрузий по геохимической характеристике гранитов. Римскими цифрами обозначены поля гранитных интрузий: I — безрудных, II — ограниченно рудоносных, III — рудоносных (IIIa — потенциально рудоносных, IIIб — рудоносных). Усл. обозн. см. на рис. 1.



ограниченно рудоносные и рудоносные. Другие свойства диаграммы рассмотрены в заключительной части статьи. Из рис. 1 видно, что по мере увеличения степени редкометальности гранитов резко возрастают диапазоны концентраций отдельных элементов в разных интрузиях. Это полностью соответствует известному принципу возрастания дисперсий концентраций по мере увеличения степени рудоносности гранитов [Таусон и др., 1965].

Диаграмма рис. 1 показывает, что уровень концентрации гранитофильных элементов в гранитных системах является наиболее общим признаком рудоносности. Остальные признаки с последним (повышенные концентрации элементов в минералах поздней стадии, специфический аксессуарный состав) связаны очевидно функционально. Автор полностью согласен с мнением В. В. Поликарпочкина о том, что признак повышенных концентраций элементов в рудоносных интрузиях является, в сущности, одним из проявлений фундаментального закона «действующих масс».

В настоящей статье автор сознательно не затрагивает подробно генетических вопросов, в частности, возможных причин возникновения в гранитах повышенных концентраций, которые неоднократно обсуждались во многих публикациях [Таусон и др., 1970; Таусон, 1977; и др.]. Любые методы идентификации рудоносных интрузий, преследующие практические цели, должны базироваться на объективных и по возможности однозначных признаках. В геологической науке, как справедливо подчеркивает Л. Н. Овчинников (1975), такие признаки должны быть статистически обоснованы. Названным требованиям вполне удовлетворяет геохимическая характеристика гранитоидов, которая хотя и определяется функционально особенностями их генезиса, но сами эти особенности непосредственным наблюдениям обычно недоступны, так как реально в геологии мы имеем дело не с гранитными расплавами, а лишь с продуктами их кристаллизации, породами гранитоидного ряда, по которым можем судить об особенностях исходных расплавов лишь весьма приближенно. Поэтому использование гипотетических предположений в числе признаков для идентификации рудоносных массивов неизбежно снизит степень определенности получаемых результатов.

Как было подчеркнуто выше, рассмотренные геохимические признаки рудоносности относятся, как правило, к лейкогранитным образованиям. Эта особенность заслуживает более подробного рассмотрения. Термин «лейкогранит» не является достаточно определенным. Обычно к лейкогранитам относят кислые члены гранитоидного ряда с содержанием кремнекислоты выше 73% и темноцветных от 1 до 3%. В принятой в качестве международной номенклатуре [Классификация и номенклатура..., 1975] предлагается расширение понятия «лейкогранит» до 5% темноцветных минералов, и следовательно, как можно полагать, с содержанием кремне-

кислоты от 71—72% и выше. Такое определение более отвечает понятию «лейкогранит», которое имеется в виду в настоящей работе, так как большинство рассматриваемых редкометальных гранитов содержит 4—6% биотита.

Вопрос о минеральном составе и количестве биотита имеет принципиальное значение, если иметь в виду, что биотит в лейкогранитах является основным породообразующим минералом-концентратором [Таусон, 1961] элементов — главных индикаторов рудоносности — Li, Sn, F. Согласно теоретическим положениям [Рябчиков, 1965, 1972], концентраций элементов в минералах определяются равновесием между кристаллизующейся твердой фазой и расплавом, что означает существование определенного соотношения между концентрациями элемента в минерале и расплаве, определяемого коэффициентом сокристаллизации. Комбинированное значение коэффициента для большинства редких элементов в гранитах < 1 , в чем отражается прогрессивное накопление элементов в остаточных гранитных расплавах по мере раскристаллизации системы. Исходя из этого, очевидно, что при одних и тех же концентрациях редких элементов в кристаллизующихся расплавах, благодаря принципу равновесия распределения элементов между жидкой и твердой фазами, результативное общее содержание в продуктах кристаллизации — гранитах, будет зависеть от колебаний минерального состава. Наиболее резко эта зависимость должна сказываться на содержаниях в гранитах элементов, концентрирующихся преимущественно в биотите, кристаллизующемся одним из последних, благодаря чему возможности для рассеяния элементов в решетках других минералов к моменту кристаллизации биотита практически исчерпываются. Поэтому незначительные изменения содержания биотита в лейкогранитах (в пределах 1—3%) могут сказаться очень сильно на общем уровне содержания элемента в породе. Это обстоятельство ранее обсуждалось автором [Козлов, 1969]. Накопленные материалы по геохимии биотитов позволяют рассмотреть степень зависимости концентраций элементов в гранитоидах от колебаний их минерального состава более подробно.

Статистическим анализом состава биотитов гранитоидов Забайкалья установлено, что появление сопровождающей пневматолито-гидротермальной минерализации наблюдается в связи с интрузиями, в биотитах которых средние концентрации олова достигают 60 г/т и выше; средние содержания фтора в биотитах рудоносных интрузий Забайкалья составляют около 1%. Исходя из названных нижних пределов концентраций элементов в биотитах, фиксирующих рудоносные интрузии, построены графики возможного изменения концентраций названных элементов в гранитах в зависимости от изменения содержания в них темноцветных (рис. 3). При их построении использованы следующие данные. Биотит (точнее, слюды — биотит, литиевый биотит, протолитионит, циннвальдит) концентрирует около 70—80% лития гранитоидов, от гранодиоритов до лейкогранитов. В распределении олова главное значение имеет, в отличие от лития, не биотит, а сумма темноцветных, концентрирующая около 50% общего содержания элемента в породе [Козлов, 1969, 1972]. Главным концентратором фтора является биотит, избытки этого элемента связываются частично в апатите и главным образом в аксессуарных топазе и флюорите.

Показанные на рис. 3 разграничительные линии можно рассматривать в качестве массовых пределов концентраций в гранитах, по достижении которых в связи с интрузиями будет развиваться эндогенная минерализация вследствие избыточного концентрирования редких и рудных элементов в остаточных расплавах и флюидах (остаточное концентрирование по Л. В. Таусону, 1967), первым признаком которого является появление в гранитах аксессуарных касситерита, флюорита, топаза и литиевых слюд. Естественно, что построенные граничные линии являются сугубо ориентировочными. В частности, было показано [Козлов, 1969], что благодаря

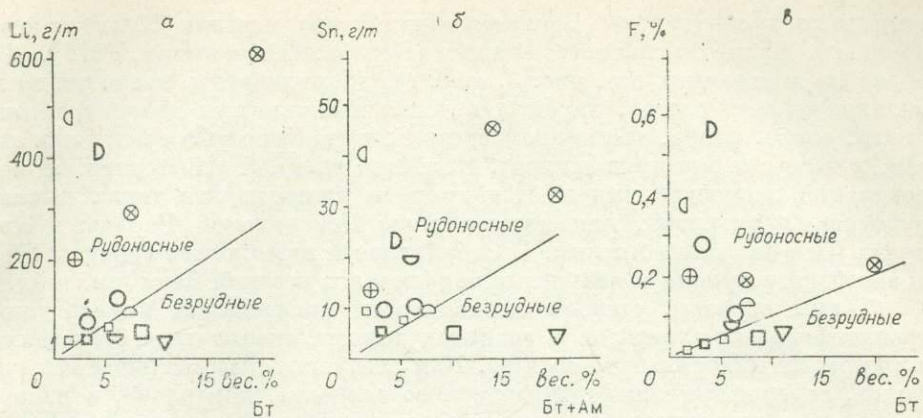


Рис. 3. Пределы концентрации лития (а), олова (б), фтора (в) в безрудных гранитах в зависимости от их минерального состава. Усл. обозн. см. на рис. 1.

резкому повышению концентраций в биотите по мере уменьшения его содержания от гранитов к лейкогранитам, в лейкогранитной части интрузий будет наблюдаться, как правило, их выполаживание. В области меланократовых гранитов (10% темноцветных) гораздо более пологий вид граничных линий в подавляющем большинстве случаев определяется низкими содержаниями элементов в биотитах и других темноцветных. Несмотря на это, приведенные на графиках граничные линии позволяют достаточно определенно решать один важный вопрос — какие именно концентрации элементов в гранитной системе следует рассматривать избыточными, предопределяющими развитие соответствующей акцессорной минерализации и постмагматического оруденения.

Из графиков видно, что в лейкогранитной области (1—2% биотита) избыточными будут практически уже кларковые концентрации олова, бериллия, фтора, лития для бедных кальцием гранитов. Очевидно, именно в этой особенности отражается обычная рудоносность лейкогранитов. Но для гранитов с содержанием биотита в 5—8% эти же кларковые концентрации являются не только не избыточными, но значительно более низкими относительно уровня, определяющего возможность появления в заметных количествах поздней и постмагматической минерализации. Поэтому, как показано ранее [Козлов, Свадковская 1977], повышенные в общем содержания олова в гранитоидах кыринского и шахтаминского комплексов Забайкалья являются в отношении рудоносности совершенно непоказательными, так как характеризуют относительно меланократовые породы (меланограниты, гранодиориты), для которых избыточные концентрации должны быть гораздо выше (см. рис. 3, б). Так, для кыринского батолитового комплекса средние концентрации олова в роговообманково-биотитовых гранитах главной фазы и лейкогранитах фазы дополнительных интрузий (ФДИ) одинаковы (5,2 г/т, см. табл. 1). Но для гранитов главной фазы с цветовым индексом около 10% весовых эти содержания не экстремальны (см. рис. 3, б), тогда как в гранитах ФДИ они являются отчетливо избыточными, что подтверждается развитием с частью интрузий ФДИ небогатого кварц-касситеритового оруденения (ограниченная рудоносность). Степень избыточности концентраций олова и фтора в гранитах харалгинского комплекса Центрального Забайкалья наиболее высока, что также согласуется с широким развитием оловянного оруденения в связи с интрузиями именно этого комплекса.

Наконец, принципиальная справедливость рассматриваемых диаграмм подтверждается теми редкими случаями, когда в интрузиях редкометальных гранитоидов присутствуют меланократовые гранодиоритовые (гибридные) разновидности пород. В Забайкалье к ним относятся редко-

металльные гранодиориты Верхнекулиндинского массива Кулиндинской группы и Мало-Кангинского массива [Козлов, Свядковская, 1977]. Как видно на диаграммах (см. рис. 3, а, б, в), гранодиориты, несмотря на их меланократовый состав, характеризуются избыточными концентрациями лития, олова, фтора, что коррелируется с рудоносностью гранитных систем, к которым они принадлежат. Наиболее высокой избыточностью концентраций элементов выделяются граниты главных фаз таких высоко-рудноносных интрузий, как Рудные горы Центральной Европы и Корнуэлл Юго-Западной Англии. В Забайкалье к ним близки граниты Шерловогорского купола и кварцевые порфиры его поздней фазы (см. табл.1).

Таким образом, степень аномальности повышенных концентраций гранитофильных элементов в гранитах должна оцениваться обязательно с учетом их минерального состава. Как следует из рассматриваемых графиков, содержание такого характерного элемента, как олово, в меланогранитах — гранодиоритах может быть значительно повышенным за счет большого содержания биотитов и амфиболов, хотя сами гранитоиды будут относиться к безрудным разновидностям.

Из приведенного обсуждения следует, что в отношении рудоносности валовые концентрации элементов в гранитах следует анализировать, как составные. Одна часть содержаний, связанная с породообразующими минералами, для рудного процесса практически потеряна (кристаллохимическое рассеяние элементов по Л. В. Таусону). Другая часть содержащихся в гранитах редких элементов, как показано анализом графика (см. рис. 3), избыточна и связана в основном в акцессорных минералах, в том числе в микроакцессорных включениях [Руб, Тронева, 1974]. В отношении рудообразования она имеет главное индикаторное значение, так как акцессорная минерализация, по существу, представляет начальную стадию этого процесса и ее интенсивность прямо коррелируется с интенсивностью послемагматического оруденения.

* *
*
*

С помощью вышерассмотренного геохимического анализа возможно разделение гранитоидных массивов на безрудные (большая часть), ограниченно рудоносные и рудоносные.

Отнесение гранитоидного массива к разряду рудоносных не означает обязательного развития в связи с ним промышленного оруденения, напротив, большинство таких массивов сопровождается лишь рассеянной минерализацией. Поэтому речь идет об определении потенциальной рудоносности гранитных массивов, т. е. лишь о констатации возможности развития в связи с ними эндогенного оруденения. Значение решения этого вопроса заключается прежде всего в том, что позволяет исключить из сферы детальных исследований заведомо безрудные гранитоиды, площади распространения которых резко преобладают.

Размещение потенциально рудоносных интрузий достаточно жестко определяет районы возможного развития сопровождающего оруденения, включающие площади гранитных массивов и области их ближних экзо-контактов, наиболее легко определяемые по ореолам ороговивования (надкровлевая область гипабиссальных интрузий). Поскольку гранитные массивы геологически выявляются несравненно легче, чем участки развития ассоциирующего с ними оруденения, предварительная оценка рудных районов по данным геохимического анализа гранитоидов является, очевидно, рациональной, хотя у этого положения имеются исключения. Так как наиболее интересующие нас площади располагаются в надкровлевой области интрузий, оценка рудных районов по геохимическим особенностям гранитов будет невозможной, если последние еще не вскрыты эрозией.

Представляется, что значение выделения по геохимическим признакам группы ограниченно рудоносных интрузий заключается также не в выявлении рудоносных районов, а в оценке степени перспективности обычно уже известных и нередко многочисленных рудопроявлений с помощью геохимического анализа гранитов тех массивов, с которыми эти рудопроявления ассоциируют. Именно эта задача решалась в Центральном Забайкалье [Козлов, Сवादковская, 1972, 1977; Козлов, 1974], где на основе результатов геохимического изучения гранитоидов была показана малая перспективность оловорудной минерализации, развивающейся в связи с субредкометальными гранитами фазы дополнительных интрузий кыринского и сохондинского комплексов (ограниченно рудоносные интрузии).

Определение принадлежности массива к редкометальным означает, таким образом, только общую оценку района его размещения на развитие оловянно-вольфрам-редкометальной минерализации, что при значительных размерах интрузий (до 200—300 км²), разумеется, еще далеко от решения вопросов о наличии оруденения и участках его локализации. Наиболее распространенные граниты главной фазы, на основе геохимических данных, по которым редкометальные интрузии легко распознаются (см. рис. 1 и 2), в случае относительно низких концентраций в них фтора, оруденения, как правило, не несут и обычно не являются рудовмещающими. Рудная минерализация ассоциирует непосредственно либо с локальными по размерам участками мусковитовых гранитов, развивающихся в купольных выступах интрузий, либо с субфазой мусковитовых пегматитовых гранитов, слагающих также относительно небольшие участки, с которыми ассоциируют отдельные тела редкометальных пегматитов или кварц-касситеритовая минерализация высокотемпературного типа. В перечисленных разновидностях гранитов концентрации редких элементов и фтора по сравнению с гранитами главной фазы резко возрастают, фиксируя процесс непрерывного накопления летучих и рудных элементов в остаточных расплавах и постмагматических флюидах, непосредственно формировавших оруденение, чем и определяется его прямая связь с названными выше разновидностями мусковитовых гранитов. На диаграмме рудоносности (см. рис. 2) точки этих гранитов располагаются вблизи Li+Rb—F стороны треугольника, их связи с гранитами главной фазы показаны стрелками.

Граниты главной фазы редкометальных интрузий с высокими содержаниями фтора и особенно ультраредкометальные граниты являются, как правило, рудовмещающими. Участки оруденения размещаются в экзо- и в эндоконтактах интрузий нередко до глубин 300—500 м и характеризуются интенсивной грейзенизацией гранитов на значительных площадях. Грейзены, связанные с ультраредкометальными гранитами, представлены обычно протолитионит-цинвальдитовыми разновидностями цвиттерами [Коваленко и др., 1974]. Грейзенизация и оруденение нередко локализуются в участках развития в гранитах взрывных брекчий, формировавшихся вследствие спонтанного сброса флюидной фазы на заключительной стадии кристаллизации (Шерловая Гора в Забайкалье, Рудные горы). Ультраредкометальные граниты могут представлять главные фазы крупных интрузий (Рудные горы, Корнуэлл, см. табл. 1), либо поздние дифференциаты редкометальных интрузий (Забайкалье, Тасмания). Последние нередко представлены кварцевыми порфирами и гранит-порфирами. В случае малых размеров таких тел (дайки) оруденение тесно ассоциирует с участками их развития; при более значительных размерах (штоки, субвулканические тела) ультраредкометальные лейкограниты, гранит-порфиры и кварцевые порфиры являются рудовмещающими (Шерловая Гора). Существенно натровые разновидности таких пород получили название онгонитов [Коваленко и др., 1971].

Точки редкометальных гранитов с высокими содержаниями фтора и ультраредкометальных гранитов на треугольной диаграмме (см. рис. 2)

Сравнительная рудоносность известково-щелочных гранитоидных

Тип интрузий, условия залегания	Размеры массивов, км ²	Фаза, соотношение площадей, %	Порода
Батолитовые массивы средних глубин	До 5000—7000	Главная, 75	Роговообманково-биотитовые и биотитовые гранодиориты и граниты
	10—30, до 200	Дополнительных интрузий, 25	Граниты биотитовые, лейкограниты, аляскиты
Гипабиссальные, субвулканические интрузии	700—300	Главная, 80—90	Гранодиориты, дациты
	2—3, до 20	Дополнительных интрузий, 10—20	Граниты биотитовые, гранит-порфиры, кварцевые порфиры
Гипабиссальные интрузии	10—300	Главная, 75	Граниты биотитовые, лейкограниты
	2—3, до 10	Купольная фа-ция, до 5	Граниты мусковитовые
	1—3, до 20—30	Субфаза, до 20	Граниты мусковитовые полосчатые, пегматитоносные
	1—10	Закл. фа-за, до 10	Лейкограниты, амазонитовые гранит-порфиры, кварцевые порфиры
Гипабиссальные интрузии	2—300	Главная, 82—95	Граниты биотитовые, лейкограниты
	До 2	Закл. фа-за, 5—10	Лейкограниты, гранит-порфиры, кварцевые порфиры
Гипабиссальные интрузии	3—5—300	Главная, 85—95	Li — биотитовые граниты, протолитионитовые граниты
	до 10—20	Закл. фа-за, 5—15	Протолитионитовые лейкограниты

располагаются вблизи F—Li+Rb стороны, ближе к углу F, в чем отражается их повышенная рудоносность. Практически рудоносность особенно высока, когда такие граниты представляют главные фазы, а не поздние дифференциаты интрузий, т. е. в тех случаях, когда объемы интрузивных тел велики и процесс дифференциации был длительным. Как было показано ранее [Козлов, Свадковская, 1977], интрузии подобных гранитов, характеризующихся высокими содержаниями фтора (см. рис. 2, поле IIIб диаграммы, приближенное к фтор-редкощелочной стороне), сопровождаются преимущественно оловорудной минерализацией при подчи-

интрузий внутриконтинентальных редкометалльных провинций

Геохимическая характеристика	Рудоносность	Минерализация
Кларковые концентрации (обычно)	Безрудны	Нет
Субредкометалльные (редко)	Ограниченно рудоносны	Sn (W), пегматоидные шпирьы
Кларковые концентрации	Безрудны	Нет
Субредкометалльные	Ограниченно рудоносны	Sn (W), пневматолито-гидротермальная
Кларковые концентрации	Безрудны	Нет
Кларковые концентрации	Безрудны	Нет
Субредкометалльные (редко)	Ограниченно рудоносны	Sn, W, гидротермальная
Субредкометалльные и редкометалльные с низким содержанием F	Ограниченно рудоносны	Sn, редкие элементы, пегматоидные шпирьы
Редкометалльные	Рудоносны	W, (Sn), пневматолито-гидротермальная
Редкометалльные	Рудоносны	Редкие элементы, Sn — пегматиты, высокотемпературная гидротермальная
Ультраредкометалльные	Рудоносны, интенсивно рудоносны	Sn (W), редкие элементы, полиметаллы, пневматолито-гидротермальная
Редкометалльные с высоким (0,2%) содержанием F	Рудоносны	Sn (W, редкие элементы), пневматолито-гидротермальная
Ультраредкометалльные		
Ультраредкометалльные	Интенсивно рудоносны	Sn (W, редкие элементы, полиметаллы) пневматолито-гидротермальная

ненном значении вольфрамовой. Для редкометалльных массивов с пониженными концентрациями фтора характерно преимущественное развитие кварц-вольфрамитовой (с подчиненной кварц-касситеритовой) минерализации. Точки гранитов главных фаз таких массивов располагаются во внутренней части поля III (IIIa), а вольфрамовое оруденение в таких интрузиях локализуется непосредственно в участках мусковитовых («грейзенизированных») гранитов (показано стрелкой). С этими же интрузиями в Забайкалье связаны субфазы пегматитоносных гранитов.

Из сказанного следует, что оценка степени рудоносности гранитоидных интрузий базируется на следующих положениях: 1) выделении на геологических картах группы лейкогранитных (адамеллиты — биотитовые граниты — лейкограниты) образований (формаций или отдельных массивов в составе формаций); 2) тщательном геологическом и минералогическом петрографическом анализе строения гранитоидных массивов, включающем обязательное выделение фазовых и фациальных дифференциатов; 3) статистически обоснованной количественной (относительная ошибка определения 20%) геохимической характеристике фазово-фациальных разновидностей гранитоидов, включающей установление их химического, редкоэлементного (гранитофильные элементы) состава и уровня концентрации летучих (F, V).

Изложенные принципы решения вопроса о степени рудоносности наиболее распространенных известково-щелочных гранитоидов внутриконтинентальных редкометальных провинций в отношении редкометально-вольфрам-оловянного и оловянно-сульфидного оруденения сведены в табл. 2.

Задача предусмотренного геологического анализа строения гранитоидных систем (а также их минералогическо-петрохимического анализа) в настоящее время обычно решается при проведении кондиционных геолого-съемочных работ. Вторая задача — получение статистически обоснованной количественной геохимической характеристики гранитоидов — пока, как правило, не решается. Обеспечение ее решения является необходимым условием для применения предлагаемой методики оценки потенциальной рудоносности гранитных интрузий и выделения на этой основе наиболее рудоперспективных районов, независимо от имеющихся в нашем распоряжении сведений о наличии или отсутствии в данном районе рудопроявлений.

*Институт геохимии им. академика А. П. Виноградова
СО АН СССР, г. Иркутск*

В. А. ЗАГОСКИН

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ В ГОРНО-ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ

Горная тайга, занимающая громадные пространства на территории нашей страны, характеризуется на большей своей части неблагоприятными условиями для эффективного ведения поисковых работ. Широкое распространение болот, марей, каменных осей, курумов, ледниковых отложений, вертикальная поясность в размещении различных типов почв и растительных ассоциаций, частое увеличение мощности четвертичных образований в направлении к подножиям горных склонов, наличие во многих районах сплошной или островной многолетней мерзлоты — все это создает значительную гетерогенность зоны гипергенеза и резко изменяющую геохимическую обстановку в горизонтальном плане и заставляет искать наиболее результативные поисковые приемы для каждого из указанных фрагментов изучаемых площадей. Вместе с тем горно-таежные ландшафты в целом отличаются рядом особенностей, обуславливающих своеобразный характер миграции рудных элементов в зоне выветривания, которые также нельзя не учитывать при выборе рациональной методики поисковых работ.

Характерной общей чертой ландшафтов интересующей нас природной зоны служит прежде всего повышенная, а в криогенных областях — крайне высокая обводненность рыхлых образований, связанная с выпаде-

нием значительного количества осадков (600—1200 мм), преобладанием относительно низких среднегодовых температур, таянием снежного покрова и многолетней мерзлоты. Сохранению увлажненности грунтов способствует густая древесная и кустарниковая растительность, а также почти сплошной травяной и гумусово-моховой покров, в значительной мере препятствующие приповерхностному испарению и быстрому удалению со склонов атмосферных вод (верховодки). В этих условиях основной сток дождевых и талых вод осуществляется путем просачивания сквозь слои рыхлых отложений. На разных гипсометрических уровнях горных склонов к ним примешиваются выходящие под рыхлый чехол грунтовые воды, а на площадях развития многолетней мерзлоты — также капиллярные воды горных пород, накапливающиеся в деятельном слое в холодное время года. Вблизи подножий склонов речных долин эти смешанные по генезису воды отражают по своему микрокомпонентному составу основные геохимические особенности вышерасположенных рудных выходов и их вторичных ореолов, в том числе — ослабленных и закрытых у дневной поверхности, и могут быть успешно использованы при проведении детальных гидрохимических поисков [Загоскин и др., 1978]. Однако еще более значительна роль воды как одного из главнейших факторов, в основном определяющих интенсивность выветривания и характер миграции минеральных веществ в характеризуемой ландшафтной обстановке.

К числу важных особенностей горно-таежной зоны относится широкое развитие на наклонных участках рельефа так называемых дефлюкционных вторичных ореолов, теория которых разработана В. В. Поликарпкиным (1966, 1973 и др.), а их реальный образ изучен в различных природных обстановках Восточной Сибири, Забайкалья и других районов [Загоскин и др., 1973; Жукова, Загоскина, 1974]. Доказано, что в вертикальном продольном профиле рыхлых образований вторичные ореолы имеют вид сравнительно узких, вытянутых по уклону слоев, залегающих на той или иной глубине от современной дневной поверхности. Наиболее высокими концентрациями рудных элементов в поперечном сечении характеризуются центральные части слоев, вниз и вверх они снижаются до уровня фоновых. Общая контрастность ореола постепенно убывает вниз по склону. Глубина залегания срединных, наиболее обогащенных прослоев ореола или его верхней границы (уровень минимально-аномальных концентраций) зависит от положения коренного источника на склоне: она тем больше, чем ниже располагается рудное тело.

Подобные морфоструктурные черты и условия залегания рассматриваемых ореолов обусловлены генетическими особенностями соответствующих вмещающих сред. В условиях гумидной зоны преобладающим механизмом формирования рыхлых грунтов служит смещение их вниз по уклону под действием гравитации (течение, оседание, осыпание). Это объясняется отмеченной выше значительной — по сравнению с аридными областями — увлажненностью рыхлого покрова, особенно в районах проявления многолетней мерзлоты и на склонах северных экспозиций.

С поисковой точки зрения наиболее важным моментом является факт увеличения степени закрытости ореолов дефлюкционного типа в направлении от водоразделов к подножиям горных склонов, поскольку в данном случае существенно сужаются возможности проведения площадных литохимических поисков в поверхностном варианте.

Анализ фактических данных показывает, что суммарный процент закрытых площадей чрезвычайно велик. Согласно нашим расчетам, выполненным еще в 1966 г. по складчатому обрамлению юга Сибирской платформы (в границах Иркутской области), 75% всех известных здесь месторождений и рудопроявлений находятся или первоначально были открыты в верхних частях гор и возвышенностей, выше среднего уровня склонов местных речных долин. Остальная часть рудных объектов (25%), расположенных в относительно пониженных участках рельефа, приурочена

к скальным обнажениям речных долин, крутым выпуклым склонам южных экспозиций и т. п. В условиях Патомского нагорья, для которого характерны сглаженные формы рельефа и широкое развитие многолетней мерзлоты, практически все выявленные на рассматриваемый момент времени коренные проявления тяготеют к вершинам водоразделов и исторически получали названия соответствующих топографических «гольцов». В то же время по отношению ко всей территории суммарная площадь участков, где сосредоточивается главная масса месторождений (водоразделы и верхние уровни склонов), не превышает 25—30%. Аналогичные или достаточно близкие цифры для других районов получены Н. В. Шарковым, Б. И. Бурдэ, Э. Ф. Жбановым и др.

Следовательно, широко практикуемыми до сих пор площадными металлометрическими съемками, равно как и всеми другими поверхностными поисковыми методами (визуальные обследования, шлиховое опробование и др.), территория горной тайги не опосковывается в связи с преобладающим развитием здесь закрытых или сильно ослабленных на используемом уровне опробования вторичных литохимических ореолов.

Важной особенностью горно-таежной зоны, которая еще требует углубленного изучения, является широкое развитие явлений обеднения вторичных ореолов рассеяния, связанных с выщелачиванием значительного числа рудных элементов из верхних слоев рыхлых образований в существующих здесь условиях постоянного промывного режима почвенно-грунтовыми водами, повышение содержания органики и сильно кислой реакции почв ($pH = 3-5$). Наиболее интенсивно данный процесс проявляется в пределах относительно вышоложенных элементов рельефа (выравненные водоразделы, приподножные части склонов и пр.) над полисульфидными рудами, особенно, если они залегают среди карбонатных пород [Миляев, Шарков, 1971; Серегин, 1971].

Вместе с тем накапливающиеся в последнее время материалы свидетельствуют о более широких масштабах описываемого явления. Например, факты существенного ослабления вторичных литохимических ореолов отмечаются даже для малосульфидных кварцевожилных образований, залегающих в силикатных породах на достаточно крутых затаеженных горных склонах [Загоскина, 1977]. При этом неодинаковая степень подвижности различных рудных элементов нередко обуславливает своеобразную горизонтальную зональность в строении ореолов: в центральных частях располагаются относительно малоподвижные металлы (золото, вольфрам, свинец и др.), а на периферии, чаще всего вблизи подножий склонов, в повышенных концентрациях отмечаются наиболее активные водные мигранты (цинк, медь, никель, кобальт, марганец и др.), образующие здесь барьерные аномалии предположительно сорбционно-солевого типа.

В поисковом отношении активное действие выщелачивания рудных элементов из вторичных ореолов, особенно в приповерхностной зоне, играет неблагоприятную роль, поскольку снижает общий, и без того недостаточно высокий процент площадей открытых категорий.

К одной из примечательных особенностей горно-таежной зоны, которая не привлекла еще должного внимания исследователей, следует отнести широкое проявление в рыхлом покрове явлений суффозии, или механического вымывания мелких минеральных частиц почвенно-грунтовыми водами. Данный процесс наиболее изучен применительно к лесовидным отложениям, однако в интересующих нас районах явления аналогичной природы находят достаточно яркое выражение, особенно на площадях развития крупнообломочных образований [Бурдэ и др., 1973]. Следствием суффозии служит прежде всего наличие в составе рыхлого покрова горизонтов так называемых «сухарей», сложенных преимущественно относительно крупными обломками и практически нацело лишенных мелкозема. Наиболее интенсивно такие горизонты развиваются в рыхлых грунтах перигляциальных областей, на уровне длительного стояния гра-

ницы сезонно-талого и мерзлого слоев, где в результате постоянного нисходящего просачивания вод в теплое время года вымывание мелкого материала происходит особенно активно. Поскольку скорость фильтрации природных вод невелика, то выносятся лишь наиболее тонкие частицы, а остальной мелкозем просыпается через каркас крупных обломков в нижележащие слои рыхлых образований [Загоскина, 1977].

Вымывание тонкого материала отмечено также для курумов [Тайсаев, 1977], а наши данные последних лет свидетельствуют о том, что суффозионный процесс действует всюду, где имеет место обводнение склоновых грунтов. При этом на его интенсивность, кроме степени увлажнения, влияет ряд других природных факторов: строение и состав рыхлых масс, величина угла склона, характер почвенно-растительного покрова, положение в поясной вертикальной зональности, литологический состав выветриваемых пород и т. д. В данном отношении наиболее благоприятные условия для проявления суффозии имеют место в гольцовых ландшафтах, особенно на участках широкого распространения тонкозернистых слоистых пород (сланцев, алевролитов, филлитов и пр.).

Поведение рудообразующих минералов при действии суффозионных процессов в основном определяется их удельным весом, механической устойчивостью к агентам выветривания и, естественно, размерами частиц. Относительно легкие и неустойчивые минералы, к которым относится большинство гипергенных минералов, образующихся за счет химических превращений различных сульфидов и характеризующихся охристыми, губчатыми, пленочными формами выделений, достаточно быстро сносятся вниз по уклону вместе со взвешенными породными частицами, и продуктивность соответствующих ореолов уменьшается. Наоборот, скорость перемещения в этих условиях тяжелых и устойчивых минералов, к числу которых в первую очередь относится самородное золото, в меньшей мере — вольфрамит, касситерит, висмутин, магнетит и другие, сравнительно замедлена, вследствие чего продуктивность вторичных ореолов оказывается выше продуктивности питающих коренных источников. Иначе говоря, происходит либо ослабление, либо усиление вторичных литохимических ореолов. Имеющиеся у нас пока еще ограниченные данные свидетельствуют о том, что, например, для золота величины концентрации варьируют от 3—8 (на типичных затаеженных склонах разной крутизны) до нескольких десятков раз (в гольцовых мерзлотных ландшафтах). Данный вопрос требует дальнейшей серьезной проработки, поскольку без знаний степени обеднения или обогащения ореолов теми или иными рудными элементами в определенных природных обстановках невозможно правильно осуществить их количественную интерпретацию.

Приведенные специфические особенности горной тайги свидетельствуют о многообразии существующих здесь природных условий, сложности протекающих в зоне выветривания процессов, крайне высокой степени закрытости ее территории. Все это требует совершенствования применяемых поисковых методов, их продуманного комплексирования и комбинирования в зависимости от фактических ландшафтных обстановок на обследуемых площадях. В соответствии с этим одним из первых главных условий повышения поисковой эффективности геохимических методов в характеризуемой природной зоне служит увеличение их глубинности на всех этапах геологоразведочных работ.

На стадии общих поисков, выполняемых в процессе планомерных государственных геосъемок масштабов 1 : 200000—1 : 50000 и геологического доизучения перспективных площадей, наиболее рациональным нужно признать метод поисков по потокам рассеяния, и это доказывается практически опытом последних лет. Кроме главного своего достоинства, заключающегося в более высокой его глубинности по сравнению с площадными металлотрическими съемками (закрытые вторичные ореолы проявляются в речных отложениях в виде потоков открытого типа), этот

метод обладает еще рядом важных преимуществ: простотой в исполнении и организации, относительно малой плотностью опробования, оперативностью и дешевизной работ. На применение метода в принципе не влияет отмечавшееся выше многообразие ландшафтных ситуаций на территории горно-таежной зоны, с его помощью осуществляется разбраковка изучаемой площади по степени перспективности и выделяются участки для постановки дальнейших более детальных поисков.

В районах, отличающихся относительно сложными поисковыми обстановками, характерными прежде всего для платформенных областей и их краевых прогибов (низкогорные ландшафты, слабая разветвленность речной сети, общая повышенная мощность рыхлого покрова, широкое распространение аллохтонных образований и т. п.), литохимические поиски по потокам рассеяния целесообразно сочетать с гидрохимическими исследованиями.

Кроме названных поисковых методов, весьма целесообразно, особенно в трудных природных условиях, осуществлять аналитическое изучение шлихов (шлихо-геохимический метод), систематически отбираемых в ходе вышеуказанных геологосъемочных работ. Выделяемые этим способом потоки, как показывают имеющиеся фактические данные, характеризуются более высокой контрастностью (иногда на порядок), большей устойчивостью содержаний рудных элементов и гораздо более значительной информативностью о природе источников аномалий. Спектральный анализ достаточно уверенно фиксирует появление в шлихах вольфрамита, шеелита, тантало-ниобатов, касситерита, минералов редких земель и тория, хромита, марганцевых минералов, сульфидов меди, свинца, цинка, мышьяка и висмута (в знаках и редких знаках); апатита, циркона, ильменита (при минимальных весовых содержаниях). Выделяются также аномалии, связанные с месторождениями металлов, которые не образуют собственных минеральных видов, а концентрируются в определенных рудных или породообразующих минералах. Нередко в шлихах удается обнаружить такие рудные элементы, которые, как правило, не улавливаются при анализе обычных речных илов; к ним относятся тантал, ниобий, галлий, редкие земли, гафний, цирконий, сурьма, висмут и др. В целом, по сравнению с литохимическими потоками, шлихо-геохимические более выразительны по олову, вольфраму, висмуту, редким землям, торию, цирконию, гафнию, свинцу, цинку, сурьме, мышьяку, серебру, литию, однако менее отчетливы по бериллию и молибдену. Расширение геохимических спектров обследуемых аномалий дает также возможность высказывать более обоснованные суждения о вероятном формационном типе искомого оруденения.

Широкое использование при региональных поисках методов, основанных на геохимическом изучении современных речных образований, крайне остро ставит вопрос о разработке наиболее эффективных приемов обнаружения коренных рудных источников в пределах перспективных участков, выделяемых по потокам рассеяния. Именно на этом промежуточном этапе работ — переходе от потоков ко вторичным ореолам и рудным выходам на прилегающих горных склонах — возникают наибольшие методические трудности, обусловленные специфическими многообразными природными обстановками горно-таежной зоны, которые рассматривались выше.

В отличие от аридных областей, с преобладающим развитием здесь диффузионных механических ореолов открытого типа, уверенно выявляемых с помощью поверхностных металлометрических съемок, методика проведения заверочно-детализационных геохимических работ в условиях горной тайги не может быть строго регламентированной, стандартной. В каждом конкретном случае, в зависимости от фактических ландшафтных особенностей обследуемой площади и ее отдельных фрагментов, как уже подчеркивалось, должен выбираться тот или иной оптимальный вариант

методики поисковых работ. Этому в значительной мере способствует составление для соответствующих перспективных площадей карт районирования по условиям применения геохимических поисков, на которых должны быть раздельно оконтурены участки с закрытыми и ослабленными у дневной поверхности вторичными ореолами, а также обозначены границы распространения болот, каменных осыпей, курумов, многолетней мерзлоты, аллохтонов и прочих площадей с наиболее трудными природными обстановками.

В относительно несложных ландшафтных условиях, т. е. при преобладающем распространении в контурах площади предстоящих работ участков с открытыми вторичными ореолами, решение поставленной задачи, как и в случае аридных районов, может быть достигнуто проведением только одной металлотрической съемки с обычным неглубоким (из иллювиального почвенного слоя) отбором проб. Вместе с тем, как показывает практический опыт, во многих случаях такая методика работ не может гарантировать от пропуска месторождений, в том числе — средних и даже крупных по запасам минерального сырья. В таких случаях неизбежно привлечение других, более глубинных в соответствующих условиях поисковых методов: гидро-, биогеохимических, глубинных литохимических и различного рода специальных модификаций этих методов, приспособленных к конкретным природным обстановкам горно-таежной зоны. В числе последних можно назвать гидрохимические поиски по склоновым водам, поиски по суффозионным нижнесклоновым илам, кварц-геохимический и торфогеохимический методы, поиски по железистым осадкам, шлихо-геохимические исследования.

Гидрохимические поиски по склоновым водам представляют собой одну из разновидностей названного метода, когда объектом опробования служат природные воды рыхлых склоновых образований, о генетических особенностях которых упоминалось выше. Основное назначение метода — опосредованное обследование площадей с относительно сложными ландшафтно-геоморфологическими условиями, где проведение других видов геохимических обследований недостаточно надежно или заведомо неэффективно. Наиболее рационально этот метод использовать при поисках на затаяженных склонах северных экспозиций, где весьма интенсивно проявлены многолетняя мерзлота, каменные осыпи, курумы. Техника исполнения работ несложна. Отбор проб осуществляется из закопшек глубиной 30—70 см, проводимых вдоль подножий склонов с заданным интервалом (200—500 м).

Поиски по суффозионным нижнесклоновым илам — один из приемов обследований северных склонов, отличающихся особо сложными поисковыми обстановками (интенсивное развитие многолетней мерзлоты, сплошной моховой покров, залесенность, отсутствие коренной обнаженности), а также курумов. Материалом опробования служит тонкий глинисто-илистый материал в пониженных частях склонов, накапливающийся после ливневых дождей в виде своеобразных потоков по мелким продольным ложбинам, рывинам, тропам или даже натеков на поверхности мха и растительной подстилки, как отмечалось выше, эти образования формируются за счет суффозионного выноса водами тонких фракций из рыхлого покрова вышележащих уровней склона (с образованием здесь «сухареЙ»), а также в результате поверхностного сноса аналогичного материала, выдавленного на дневную поверхность под действием криогенных процессов (бугры пучения, пятна-медальоны и пр.). Тем самым при геохимическом опробовании характеризующих илов извлекается информация о составе рыхлых образований (вторичных ореолов) верхних, средних и в некоторой мере нижних уровней склона. Глубинность метода пока не выяснена, во всяком случае она выше глубинности металлотрической съемки в поверхностном варианте. Метод находится в стадии апробации. В дальнейшем намечается его использование в сочетании с гидрохимическими поисками по склоновым водам.

Кварц-геохимический метод [Загоскин и др., 1975] разработан и внедрен в практику работ на рудное золото для опробования площадей, характеризующихся развитием сплошных каменных осыпей, где другие обычные методы площадных обследований малоэффективны или просто неприменимы из-за отсутствия материала для опробования (почвы, растения и пр.). Он основан на использовании в качестве материала опробования жильного кварца — одного из главных минералов, в котором золото вместе с сопутствующими ему рудными элементами в наибольшей степени концентрируются в рудах. Это определяет целенаправленность поисков, значительную контрастность получаемых аномалий и высокую степень коррелируемости данных с соответствующим коренным источником. Пробоотбор осуществляется из глыб и обломков (5—10 сколков, объединяемых в одну пробу общим весом 50—100 г), которые легко обнаруживаются среди всех прочих обломочных образований. Есть основания считать, что данный прием может оказаться эффективным и при поисках других месторождений кварцево-жильной формации.

Возможности использования в качестве объекта геохимического опробования торфов и железистых осадков, возникающих на кислородных барьерах и местах высачивания грунтовых вод, рассмотрены в работах Т. Т. Тайсаева (1974, 1977), в которых доказывается целесообразность применения предлагаемых им способов в условиях заболоченных площадей и на нижних частях пологих обводненных склонов.

Шлихо-геохимические исследования, как и на этапе общих поисков, во многих случаях позволяют получать дополнительную, нередко весьма ценную информацию и при крупномасштабных площадных поисках. При выполнении данного метода в комплексе этих работ преследуется та же цель — усилить контрастность и расширить геохимические спектры изучаемых аномалий. В соответствии с местными геологическими и ландшафтными особенностями могут практиковаться различные модификации рассматриваемых исследований (анализ тех или иных фракций или минералов шлиховых проб, отмывка специальных шлихов малого веса и др.), т. е. предлагается разумный, творческий подход.

При детализационно-заверочных работах, являющихся, как уже отмечалось выше, наиболее трудным и ответственным этапом всего поискового цикла, весьма перспективным и прогрессивным представляется использование атмосферических и аэрозольного геохимического методов. Естественно, что для этого требуется предварительное проведение опытно-методических работ на различных рудных объектах, располагающихся в типичных природных обстановках горно-таежной зоны.

На этапе поисково-оценочных работ, когда осуществляется вскрытие и прослеживание горными выработками или скважинами локальных аномалий, оцененных как перспективные, в задачу геохимических исследований нужно ставить изучение вторичных ореолов рассеяния на глубину (способом вертикального секционного опробования), а также установление наиболее точных контуров рудных образований путем систематического опробования вскрываемых коренных пород либо поиски скрытого оруденения, если под рыхлым покровом обнажаются лишь верхние части его первичных ореолов.

Одной из общих поисковых проблем, требующих серьезных методических разработок и в прикладной геохимии, служит обнаружение месторождений полезных ископаемых, залегающих в днищах речных долин под покровом аллювиальных отложений и составляющих в совокупности довольно значительный минерально-сырьевой резерв, который недостаточными темпами и далеко не полно реализуется даже в экономически освоенных рудных районах. В условиях горной тайги, характеризующихся трудными поисковыми обстановками на пониженных элементах рельефа вообще, решение данной проблемы представляется особенно актуальным.

Совершенно очевидно, что сложность выявления месторождений в речных долинах объясняется крайне слабой проявленностью их вторичных ореолов и потоков рассеяния в приповерхностной части аллювия. Как показывает практика, в подавляющем большинстве случаев интересные нас объекты открываются либо в пределах пересекающих долины рудоконтролирующих структур, первоначально выявленных в относительно простых ландшафтных обстановках и в дальнейшем пролеженных горно-буровыми работами по простирацию, либо при осуществлении поисково-разведочного бурения на россыпи. Более простые используемые для этих целей методы (геофизические, геохимические, минералогические) пока еще недостаточно эффективны.

Вместе с тем существуют особые ситуации, когда сравнительно простые поисковые приемы могут успешно применяться для решения рассматриваемой практической задачи. Примером подобных ситуаций служат территории дражных отработок в золотоносных районах, основные объемы которых выполнены в восточных районах нашей страны, т. е. в преобладающей своей части в пределах распространения горно-таежных ландшафтов. Аллювиальные отложения эксплуатировавшихся здесь водотоков оказываются достаточно интенсивно перемешанными, а на участках перекрытого оруденения — обогащенными соответствующими рудными элементами по всему вертикальному разрезу (за счет относительно контрастных ореолов и потоков рассеяния в приплотиковых горизонтах). Наибольшая степень такого обогащения имеет место в самых верхних частях переработанного аллювия, что обуславливается применяемой технологией добычи золота из россыпей: при дражной обработке — сплошная промывка рыхлых масс с постепенным углублением до дна долины и даже захватом верхнего наиболее выветрелого и трещиноватого слоя коренных пород плотика; при подземных старательских разработках — селективная выемка материала золотоносных пластов, локализующихся преимущественно в низах разреза аллювиальных отложений, с отмывкой его на дневной поверхности.

В отработанных речных долинах формируются новые русла, причем в составе русловых отложений преобладающую роль играют глины и илы. Особенно активен процесс их образования в периоды ливневых дождей, когда происходит интенсивный вынос тонкого материала с отвалов и отложение его вдоль русла.

Вышеизложенное позволяет ожидать, что при проведении литохимических поисков по потокам рассеяния с опробованием тонких фракций (илов) новообразованных русловых отложений на площадях бывшей эксплуатации золотоносных россыпей должны более уверенно выявляться геохимические аномалии, связанные с рудными месторождениями под аллювиальным чехлом.

Результаты наших научно-производственных геохимических изысканий, проведенных в последнее время в пределах двух крупных золотоносных провинций Сибири, подтверждают высказанные соображения. Повышенными концентрациями рудных элементов в современных русловых илах обозначились известные коренные месторождения в речных долинах; кроме того, выделен более многочисленный ряд аномалий, которые интерпретируются как индикаторы новых аналогичных объектов. Весьма характерно, что большая часть таких аномалий тяготеет к водотокам, совпадающим с простираем главных рудоконтролирующих структур на изученных площадях. В то же время на прилегающих горных склонах, достаточно детально опосредованных в прежние годы и обследованных комплексом геохимических методов (лито-, гидро- и биогеохимических) в процессе наших работ, не обнаружено сколько-нибудь значительных проявлений коренной минерализации, а в составе обломочных фракций аллювия отмечается исключительно высокий процент жильного кварца. Предполагается, что речные долины в данном случае приурочены к тектоническим зонам, в пределах которых локализуется искомое оруденение.

Результаты наших научно-производственных геохимических изысканий, проведенных в последнее время в пределах двух крупных золотоносных провинций Сибири, подтверждают высказанные соображения. Повышенными концентрациями рудных элементов в современных русловых илах обозначились известные коренные месторождения в речных долинах; кроме того, выделен более многочисленный ряд аномалий, которые интерпретируются как индикаторы новых аналогичных объектов. Весьма характерно, что большая часть таких аномалий тяготеет к водотокам, совпадающим с простиранием главных рудоконтролирующих структур на изученных площадях. В то же время на прилегающих горных склонах, достаточно детально опоскованных в прежние годы и обследованных комплексом геохимических методов (лито-, гидро- и биогеохимических) в процессе наших работ, не обнаружено сколько-нибудь значительных проявлений коренной минерализации, а в составе обломочных фракций аллювия отмечается исключительно высокий процент жильного кварца. Предполагается, что речные долины в данном случае приурочены к тектоническим зонам, в пределах которых локализуется искомое оруденение.

Обсуждаемая проблема приобретает особо важное прикладное значение в связи с тем, что месторождения жильно-прожилкового типа, которые в последние годы являются основным объектом геологоразведочных работ на рудное золото, локализуются преимущественно на нижних структурных этажах и в подавляющей своей части не выходят на дневную поверхность (скрытое оруденение).

В связи со сложными многообразными процессами формирования и интенсивными преобразованиями (ослабление, усиление) вторичных литохимических ореолов в условиях горно-таежной зоны первостепенное значение приобретает проблема их количественной интерпретации, а также установление принципиально новых критериев разбраковки аномалий. Эти вопросы требуют самостоятельного рассмотрения.

В заключение следует подчеркнуть, что совершенствование методики поисков в специфических природных условиях горной тайги имеет важное народнохозяйственное значение. Существующая здесь вплоть до настоящего времени низкая эффективность поисковых работ, как все более выясняется, в основном обусловлена невысоким суммарным процентом площадей открытых категорий, в пределах которых сосредоточено абсолютное большинство всех выявленных месторождений полезных ископаемых, и в то же время резко преобладающим распространением закрытых площадей, где, несомненно, таится неисчерпаемый резерв разнообразных минеральных ресурсов. Логично утверждать, что наиболее широко практикуемые до сих пор во многих регионах горно-таежной зоны методы (визуальное обследование, шпиховое опробование, поверхностные металлометрические съемки) в условиях закрытых площадей обладают недостаточной глубинностью, даже несмотря на то, что наиболее обычные здесь мощности перекрывающего рыхлого покрова сравнительно невелики (2—5, реже до 10—15 м). Иначе говоря, месторождения на этих обширных в своей совокупности площадях лишь прикрыты маломощным чехлом рыхлых образований, который тем не менее достаточно совершенно их маскирует и делает скрытыми у современной дневной поверхности. Следовательно, известный справедливый тезис В. И. Красникова о значительности фонда глубокозалегающих месторождений можно расширить в том смысле, что на территории горно-таежной зоны мы располагаем, пожалуй, еще более значительными потенциальными возможностями приращения общего минерально-сырьевого фонда за счет выявления месторождений, выходящих на поверхность коренных пород под сравнительно маломощным рыхлым покровом, равно как и под более мощными аналогичными образованиями. Эффективность и темпы реализации этого фонда в значительной мере будут зависеть от того, насколько решительно прежняя укореившаяся методика поисковых работ будет заменена более соот-

ветствующей природным условиям характеризуемой ландшафтной зоны. Целью настоящей статьи и является попытка высказать некоторые соображения и рекомендации в плане затронутой важной проблемы.

*Институт геологии
им. академика А. П. Виноградова СО АН СССР, г. Иркутск*

Л. А. ФИЛИПОВА

ПОИСКИ ПО ПОТОКАМ РАССЕЯНИЯ В РАЙОНАХ С РАЗВИТОЙ ГОРНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ

Увеличение запасов и расширение ассортимента полезных ископаемых в старых горно-промышленных районах имеет большое экономическое и социальное значение, заключающееся в том, что освоение их может вестись без дополнительных денежных затрат, на базе уже готовых горнорудных предприятий и коммуникаций, а население этих районов обеспечивается работой. К тому же в странах, имеющих небольшие территории и геологически уже хорошо изученных (например, страны Европейского континента), возможность открытия новых рудных районов очень мала. Поэтому решение вопросов опоскования старых горно-промышленных районов с целью открытия новых месторождений представляет собой актуальную задачу.

Обычно метод поисков по потокам рассеяния рекомендуется применять на первых стадиях изучения территорий, особенно слабоосвоенных, когда необходимо выявить общие закономерности пространственного размещения месторождений и определить ее рудные перспективы [Поликарпочкин, 1976, 1979; Armour-Brown, Nichol, 1970; Garrett, Nichol, 1967; Инструкция..., 1965]. Так же результативен этот метод и на более детальных стадиях поисковых работ с целью выявления отдельных месторождений, в том числе в хорошо изученных районах с развитой горно-промышленной деятельностью [Поликарпочкин и др., 1978], где часть месторождений разведана, начата или уже заканчивается их отработка.

Это обусловлено тем, что поиски по потокам рассеяния отличаются от широко применяемых в рудных районах металлометрических съемок повышенной глубиной, что дает возможность обнаруживать месторождения, которые находятся в трудных поисковых условиях или не выходят на поверхность эрозионного среза. Кроме того, с помощью данного метода могут быть обнаружены месторождения таких типов и элементов, на которые не обращено внимание при поисковых работах в прежние годы [Поликарпочкин и др., 1978].

Однако применение метода поисков по потокам рассеяния в таких районах встречает затруднение, так как реки их в результате горно-промышленной деятельности обычно сильно загрязнены металлами. В них попадает рудный материал из располагающихся на склонах, а иногда и на дне долин горных отвалов от разведочных и эксплуатационных выработок. Как правило, в реки сбрасываются сильно обогащенные различными металлами рудничные воды и отходы обогатительных фабрик, которые переносятся рекой на большие расстояния, загрязняя на всем пути воду, русловые, а во время паводков и пойменные отложения. При длительном хранении хвосты обогатительных фабрик подвергаются ветровой эрозии, в результате которой рудный материал их в виде пыли разносится по территории, попадая в другие реки района.

В тех случаях, когда месторождение полезного ископаемого представлено россыпью, которая обрабатывается дражным способом, происходит непосредственное перемешивание аллювиальных отложений. На поверхность поднимается материал из нижних частей отложений, обога-

ценный промышленным металлом и рядом сопутствующих ему элементов. Иногда промывка продуктивных отложений может производиться в определенном месте, где устанавливаются промывочные приборы и куда свозится материал со всей или значительной части россыпи. Все это может сильно нарушить природное распределение элементов в аллювиальных отложениях.

Другим фактором, вызывающим загрязнение рек в рудных районах, является бытовая деятельность населения. Обычно для покрытия улиц, дворов и других нужд рудничных поселков используется материал отвалов горных выработок, который во время дождей, таяния снегов размывается и вместе с содержащимся в нем рудным веществом сносится в реки. Этому способствует также эоловый перенос. Заметное загрязнение в реки вносят и различные бытовые стоки, обогащенные, как правило, некоторыми тяжелыми металлами [Hosking, 1971]. Наблюдения показывают, что свободные от горно-промышленных отходов реки, но протекающие в черте рудничных поселков и далеко ниже их, содержат в водах и осадках концентрации цинка, меди, мышьяка, свинца [Hosking, 1971; Филиппова, 1978].

Загрязнение рек приводит к развитию богатых и протяженных техногенных потоков рассеяния. Имеющиеся у нас данные показывают, что техногенные потоки рассеяния, особенно связанные с обогащательными фабриками, имеют концентрации элементов не менее, чем на порядок выше естественных, а длина их достигает 20 км и более [Филиппова, 1974, 1978]. Несколько меньшее загрязнение выносят отвалы горных выработок. Несомненно, что такие техногенные потоки будут полностью закрывать в аллювиальных отложениях природные аномалии, обозначающие новые месторождения. Поэтому целесообразно рассматривать вопрос — в какой мере может быть применен в таких условиях метод поисков по потокам рассеяния и каким образом можно избавиться от влияния на них техногенного загрязнения.

Хоскингом и Писарским [Hosking, 1971; Hosking, Pisarski, 1965] проводились работы по изучению потоков рассеяния в горно-промышленном районе Корнуэлла (Англия), разрабатывающегося с глубокой древности, реки которого сильно загрязнены отходами добычи и переработки руд. Они пришли к выводу, что в этих условиях применение опробования рек для поисков не дает положительного результата. Наши данные, полученные при изучении потоков рассеяния в Хапчерангинском горно-промышленном районе (Восточное Забайкалье), который начал эксплуатироваться с прошлого столетия, говорят о том, что, несмотря на загрязнение рек, полезная поисковая информация по потокам рассеяния в таких районах все же может быть получена.

Прежде всего надо иметь в виду, что хотя техногенное загрязнение в горно-промышленных районах значительно, но оно захватывает лишь часть водотоков. Загрязняются главным образом реки или их фрагменты, находящиеся в зоне влияния горно-промышленных предприятий (шахт, штолен, обогащательных фабрик, рудовозных дорог и т. п.). Остальные реки района (часто они составляют большую долю гидросети) остаются практически незатронутыми техногенными загрязнениями и имеют природное распределение элементов в аллювиальных водах. Правда, некоторые из них могут подвергаться эоловому загрязнению, но оно малозначительно и, как правило, не оказывает существенного влияния на первичное содержание элементов в реках. Поэтому для опробования таких водотоков может быть успешно применен метод по потокам рассеяния, в которых будут выявляться естественные геохимические аномалии, в том числе связанные с новыми месторождениями.

Вследствие того, что техногенное загрязнение, как отмечено выше, сильно влияет на содержание рудных элементов в потоках рассеяния и их протяженность, с практической точки зрения для выбора методики поис-

ков по потокам рассеяния в условиях техногенного загрязнения рек, большой интерес представляет глубина его проникновения в аллювиальные отложения. Проведенные нами работы в Хапчерангинском рудном районе по этому вопросу показали, что техногенное загрязнение в таких реках почти полностью снимается при отборе проб с глубины.

Вопрос глубины проникновения техногенного загрязнения изучался нами путем опробования из специально пройденных шурфов (или расчисток в обрывах пойменных отложений) в падах Большая и Малая Хапчеранга, со стороны которых шахтами и штольнями велась основная отработка оловянных и полиметаллических жил и штокверков Хапчерангинского месторождения. Шурфы располагались таким образом, что они характеризовали как головные части потоков рассеяния, так и участки, расположенные ниже по течению. Поскольку необходимо было определить, на какой глубине прекращается или резко ослабевает загрязнение аллювиальных отложений, в шурфах производилось секционное опробование с длиной интервала 20 см. Пробы брались по всем стенкам шурфа методом борозды, и материал четырех борозд объединялся в одну пробу. Чтобы избежать заражения, стенки тщательно зачищались, и опробование производилось с нижних интервалов. Кроме того, вблизи каждого шурфа или расчистки отбиралась из русловых отложений поверхностная проба. Для анализа был применен приближенно-количественный эмиссионный спектральный анализ на рудные и сопутствующие им элементы: Sn, Pb, Zn, Cu, Ag, As и др.

Падь Большая Хапчеранга вмещает полиметаллическую часть месторождения, представленную галенит-сфалеритовыми жилами. При разведке и отработке этих жил здесь пройдено несколько штолен и две шахты, вблизи устьев которых находятся горные отвалы, обогащенные свинцом, цинком и другими характерными элементами полиметаллических руд. Некоторые из этих отвалов (в частности, от шахт) располагаются непосредственно на пойме пади, где, кроме того, рассеяны металлургические шлаки от небольшого завода, который проводил здесь плавку добываемых руд в дореволюционное время и первые годы после революции.

Рудная обстановка, некоторые источники загрязнения и графики концентраций рудных элементов в техногенном (поверхностном) и естественном (по данным опробования шурфов) потоках рассеяния пади изображены на рис. 1. Здесь же показано расположение шурфов, пройденных в этой пади для изучения глубины загрязнения.

Шурфы 1 и 2 пройдены в головной части потока. Здесь на пойме находятся отвалы шахт и скопления старых металлургических шлаков, материал которых разносится ручьем вниз по течению. Шурфы 3—6 располагаются по потоку так, что загрязняющий аллювиальные отложения материал здесь может приноситься только сверху. Разрезы вскрытых шурфами отложений и графики концентраций элементов в этих разрезах показаны на рис. 2 и 3.

Мощность аллювиальных отложений по всем шести шурфам небольшая — от 0,5 до 1,5 м или немногим больше (шурф 5). На глубине шурфы, за исключением шурфа 5, вскрывают типичные отложения склонового чехла или подножия склонов, переработанные рекой и представленные суглинком с неокатанными обломками пород. Иногда горизонт склоновых отложений венчается почвой и затем следуют аллювиальные отложения (шурфы 2—4), в других случаях аллювиальные отложения залегают на этом горизонте с разрывом (шурфы 1, 6).

Аллювиальные отложения начинаются русловой фацией, представленной гравием и галечником, носящими явные следы сортировки водным потоком (шурфы 1, 2, 5) или глыбовым материалом (шурфы 3, 4, 6). На русловых отложениях располагаются отложения пойменной фации, в значительной степени переработанные современными процессами почвообразования. В шурфах 1 и 2 на аллювиальных отложениях пойменной

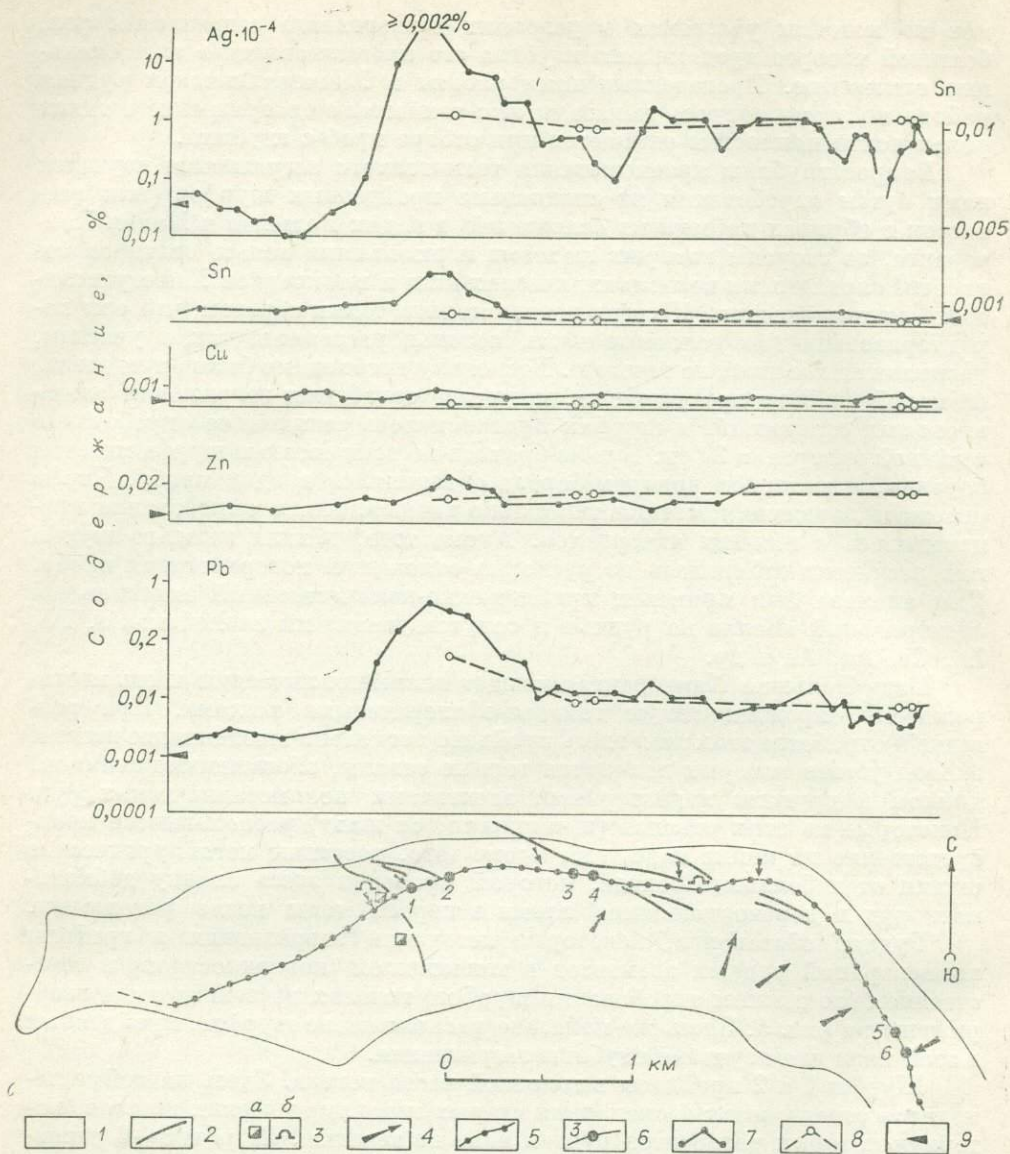


Рис. 1. Распределение рудных элементов в русловых отложениях вдоль пади Большая Хатчеранга.

1 — песчано-сланцевая толща (P_2); 2 — свинцово-цинковые жилы; 3 — горные выработки: а — шахты, б — штольни; 4 — направление сноса материала со склонов в долину; 5 — точки опробования русловых отложений с поверхности; 6 — шурфы, пройденные для изучения распределения элементов по вертикальному профилю аллювиальных отложений и их номера; 7 — графики концентраций элементов в русловых отложениях с поверхности во фракциях $< 0,5$ мм; 8 — концентрации элементов в незагрязненном потоке рассеяния по данным опробования шурфов (фракция $< 0,5$ мм); 9 — среднее фоновое содержание элементов.

(шурф 2) или русловой (шурф 1) фаций (в шурфе 1 пойменная фация целиком срезана) залегают насыпные образования, состоящие из материала горных отвалов, включая рудные обломки и шлак. На насыщенном слое развит слой почвы, что свидетельствует о его значительной давности. В шурфах 3—6 макроскопические признаки техногенного загрязнения не наблюдаются.

Как видно из графиков (см. рис. 2 и 3), ярко выраженное техногенное загрязнение распространяется лишь на небольшую глубину. Самые высокие содержания свинца (до 1% и более), олова (0,01—0,02%) наблюдаются в шурфах 1 и 2, где они соответствуют верхнему насыщенному слою,

состоящему из материала горных отвалов и шлаков. В нем повышены также содержания цинка, меди, серебра. Значительно меньшее содержание элементов в поверхностной пробе шурфа 2 может быть связано с обработкой насыпного слоя водным потоком и смешением рудного материала поверхности с приносимым рекой безрудным материалом.

Нижняя часть насыпного слоя в обоих шурфах отличается меньшими концентрациями металлов, чем верхняя. Находящиеся под ними гравийно-галечные русловые отложения по шурфу 1 характеризуются все еще высокими содержаниями свинца — порядка 0,2—0,5%. Мощность русловых отложений в шурфе 1 составляет всего лишь 50 см и возможно, что весь этот слой заражен элементами из вышележащего насыпного слоя, хотя не исключено, что наблюдаемые здесь содержания связаны с естественным потоком рассеяния. Ниже, в слое отложений склонового чехла, содержания свинца уменьшаются, но в самом слое они остаются постоянными — 0,1—0,2%, за исключением двух проб интервала 1,6—1,8 м (фракции 0,5—1 и 1—3 мм), в которых фиксируются выдающиеся содержания свинца (0,4—1%). Очевидно, в эти пробы при отборе попал загрязняющий рудный материал.

Поскольку закономерного понижения содержания элемента на глубину здесь нет, можно говорить, что слой склоновых отложений уже не подвержен сколько-нибудь существенному загрязнению, хотя он залегает всего лишь в 50 см ниже насыпного слоя, содержащего рудные обломки и шлак. По другим элементам (Zn, Sn, Cu, Ag), заметно небольшое повышение содержаний главным образом в верхней части гравийно-галечного слоя. Ниже как в последнем, так и в слое суглинка с обломками пород содержания остаются практически на одном уровне со случайными более высокими концентрациями в отдельных пробах. Следовательно, по этим элементам загрязнение распространяется на еще меньшую глубину. По шурфу 2 мощность аллювиальных отложений больше (90 см). Здесь видно, что загрязнение распространяется лишь на верхние 20—40, максимум 50 см отложений.

Графики по шурфам 1 и 2 показывают, что загрязнение затрагивает как самый мелкий (фракции $<0,5$ и 0,5—1 мм), так и более крупный материал (фракции 1—3 и 3—5 мм). Из этого следует, что распространение загрязнения на глубину связано с механическими процессами. Тонкие илистые частицы вмываются на глубину просачивающимися водами. Более крупные рудные обломки могут испытывать проседание из-за их повышенного удельного веса.

В колонке отложений, вскрытых остальными шурфами (см. рис. 3), насыпных слоев нет. По шурфам 3 и 4 загрязнением охвачена лишь верхняя часть аллювиальных отложений до глубины не более 20 см. В шурфах 5 и 6, судя по тому, что в верхней части аллювиальных отложений повышение содержаний не отмечается, загрязнение вообще не проявлено. Так как характер распределения элементов на глубину по всем фракциям одинаков, то на рис. 3 показаны данные лишь по двум фракциям.

На рис. 4 изображена падь Малая Хапчеранга, которая пересекает самую продуктивную касситерит-сульфидную зону Хапчерангинского месторождения. На склонах пади имеется большое количество разведочных и эксплуатационных горных выработок (на рис. 4 показаны лишь некоторые из них). Наиболее существенные источники загрязнения здесь — постоянно обновляющиеся отвалы действующих шахт и штольни, которые располагаются на правом склоне и непосредственно на пойме пади. Кроме того, вдоль русла пади проходит рудовозная дорога, покрытая материалом из горных отвалов, а ниже, в приустьевой части пади, на ее пойме находятся старые эфеля обогатительной фабрики. Здесь же, в приустьевой части, размещается крупный поселок, для покрытия дворов и улиц которого использован также материал горных отвалов и эфелей.

По графикам концентрации видно, что на протяжении всего рудного

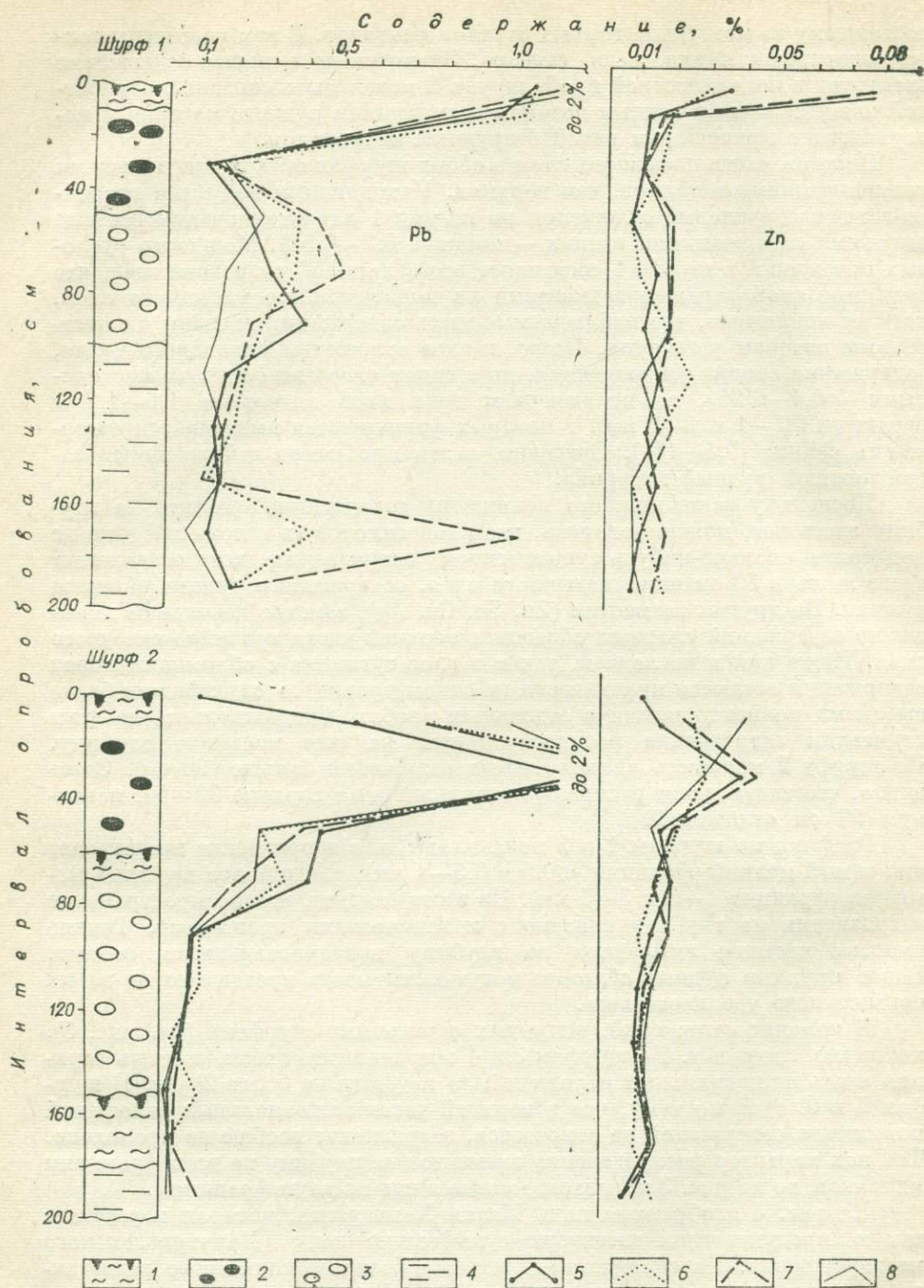
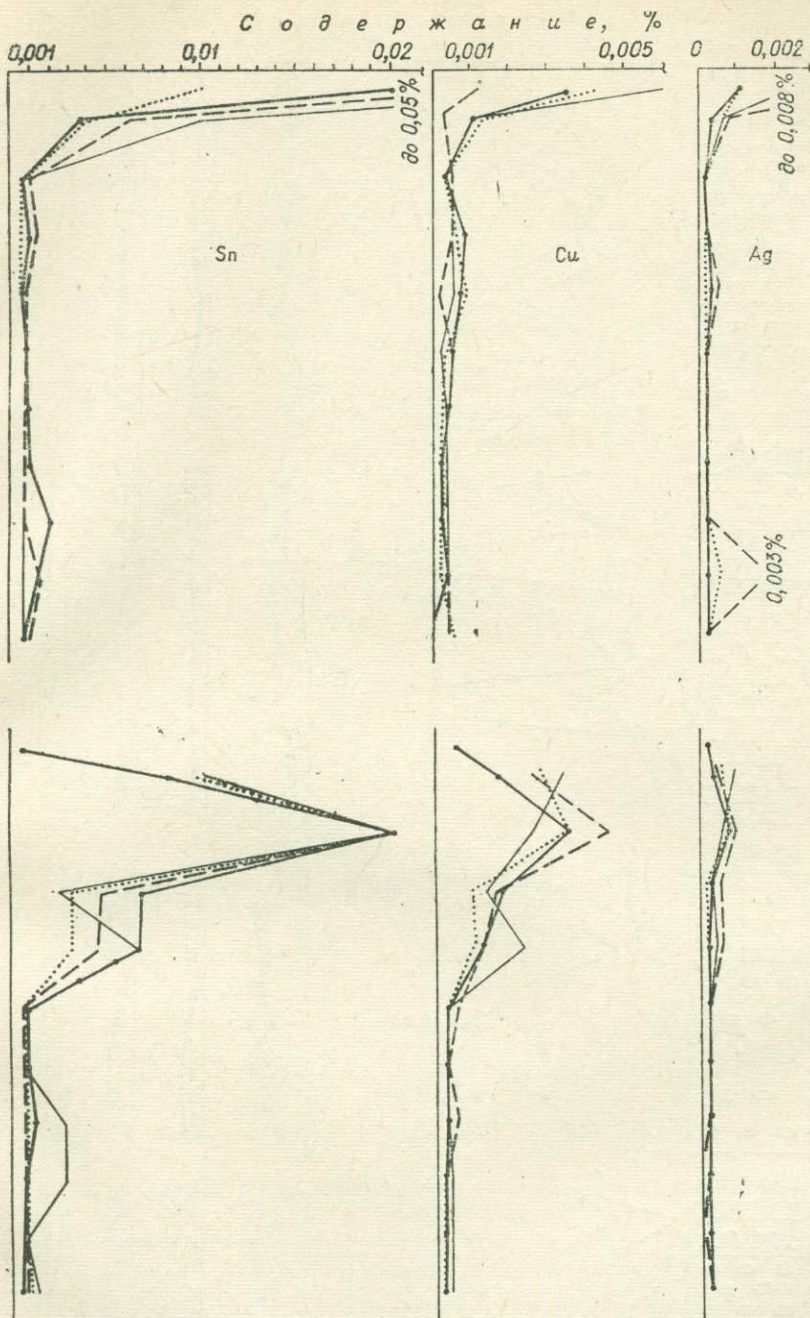


Рис. 2. Распределение рудных элементов по вертикальному разрезу отложений в головной части потока рассеяния пади Большая Хапчеранга.

1 — почва с корнями растений; 2 — насыпной грунт (шлаки и материал из отвалов горных выработок); 3 — гравийно-галечные с примесью песка речные отложения; 4 — суглинок с обломками пород (рыхлый материал склонового чехла); 5—8 — графики концентраций элементов во фракциях (мм): 5 — < 0,5; 6 — 0,5—1; 7 — 1—3; 8 — 3—5.



интервала пади и ниже его развито очень сильное техногенное загрязнение поверхностных русловых отложений. Концентрации главных рудных элементов (Sn, Pb, Zn) в них (фракция $< 0,5$ мм) ниже головной части потока составляют 0,05—0,2%, которые не ослабевают вплоть до устья пади, на расстоянии примерно 4,5 км. В то время как в естественном потоке рассеяния (тоже фракция $< 0,5$ мм), построенном по данным опробования шурфов, содержания этих элементов на том же участке пади значительно меньше (примерно в 10 раз), в приустьевой части они снижаются почти до фона, т. е. здесь естественный поток уже затихает.

В пади Малая Хапчеранга для выяснения глубины техногенного загрязнения пройдено 8 шурфов, размещенных по всей длине потока, за

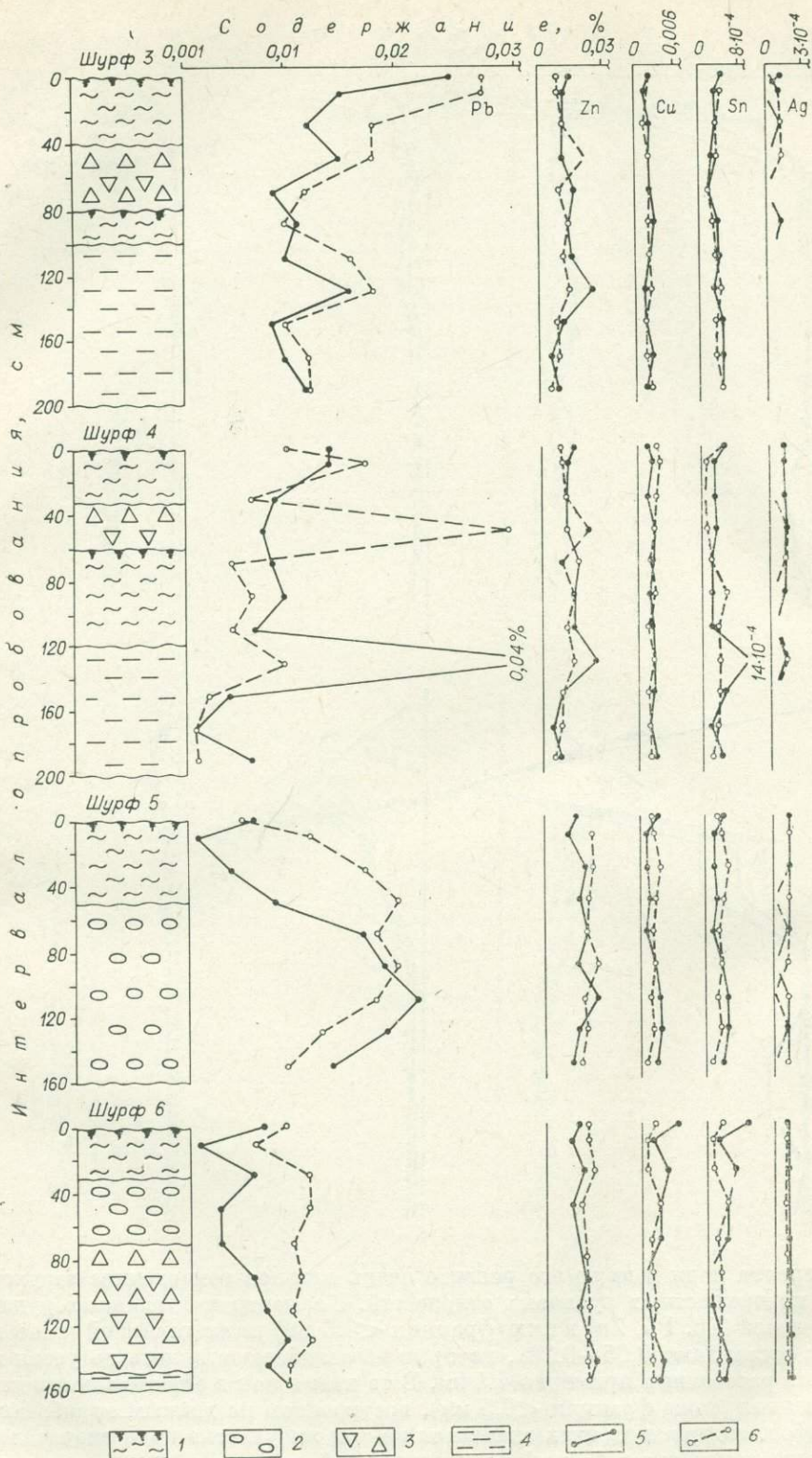


Рис. 5. Распределение рудных элементов по вертикальному разрезу отложений в средней и нижней частях потока рассеяния пади Большая Хапчеранга.

1 — почва с корнями растений; 2 — гравийно-галечные с примесью песка речные отложения; 3 — крупные неокатанные обломки пород с песком, гравием и щебнем; 4 — суглинок с обломками пород (рыхлый материал склонового чехла). 5, 6 — график концентраций элементов во фракциях (мм): 5 — 0,5; 6 — 1—3.

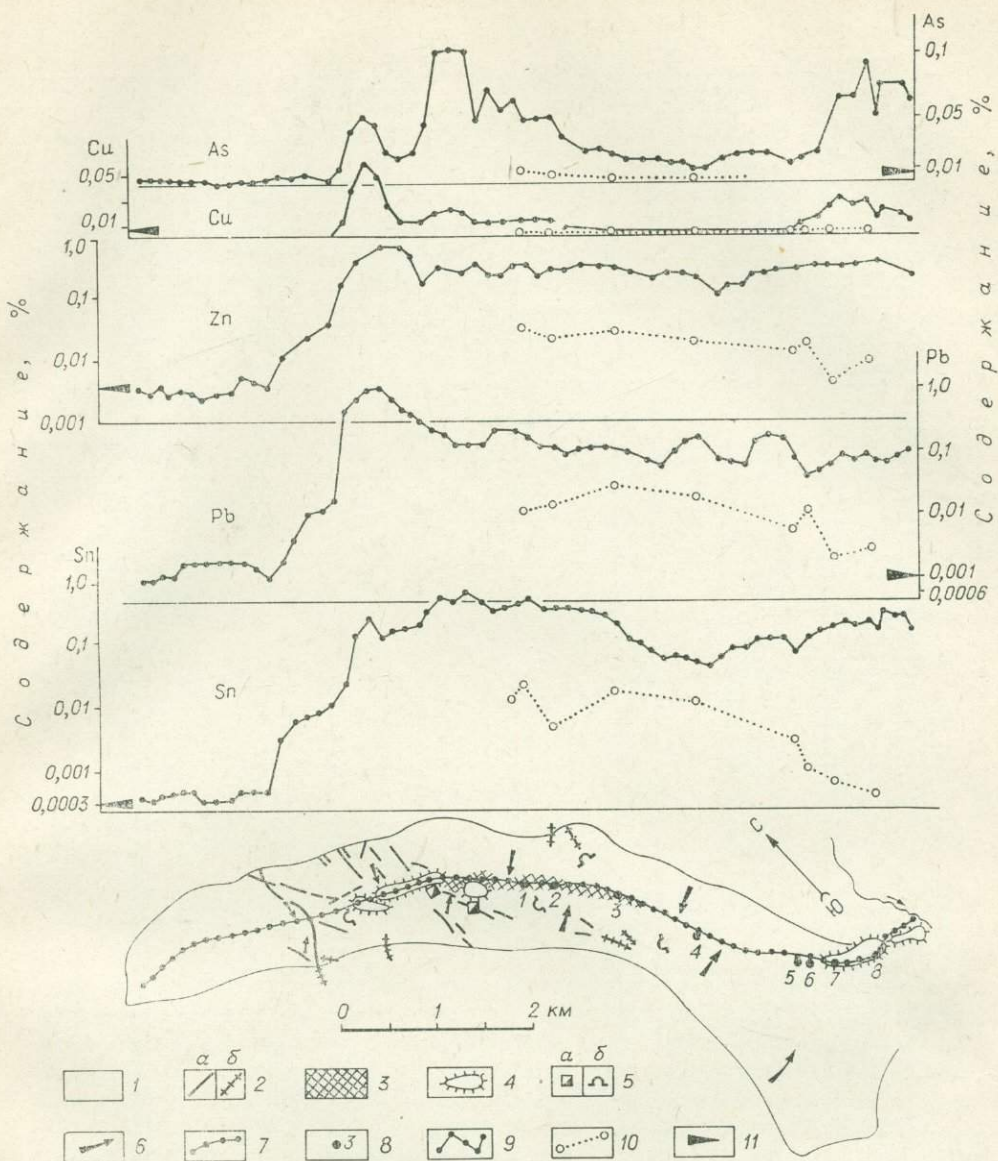


Рис. 4. Распределение рудных элементов в русловых отложениях вдоль пади Малая Хапчеранга.

1 — песчано-сланцевая толща (P_2); 2 — рудные жилы: а — касситерит-сульфидные, б — полиметаллические; 3 — россыпи касситерита; 4 — отвалы горных выработок и эфеля обогатительной фабрики; 5 — горные выработки: а — шахты, б — штольни; 6 — направление сноса материала в долину; 7 — точки опробования русловых отложений с поверхности; 8 — шурфы, пройденные для изучения распределения элементов по вертикальному профилю аллювиальных отложений и их номера; 9 — графики концентраций элементов в русловых отложениях с поверхности во фракции < 0,5 мм; 10 — концентрации элементов в незагрязненном потоке рассеяния по данным опробования шурфов (фракция < 0,5 мм); 11 — среднее фоновое содержание элементов.

исключением головной его части (см. рис. 4). Колонки разрезов, вскрытых шурфами отложений, и графики концентраций элементов по глубине показаны на рис. 5 и 6. Для шурфа 1 приведены данные по четырем фракциям. Поскольку, как видно из этих графиков, тенденция изменения концентраций на глубину во всех фракциях одинакова, для остальных шурфов представлены данные лишь по двум фракциям.

В отличие от Большой Хапчеранги подстилающие аллювий отложения склонового чехла в шурфах Малой Хапчеранги не вскрыты. Лишь в шурфе 4 вскрыта постель аллювиальных отложений. Специфической особенностью аллювиальных отложений пади является наличие в них

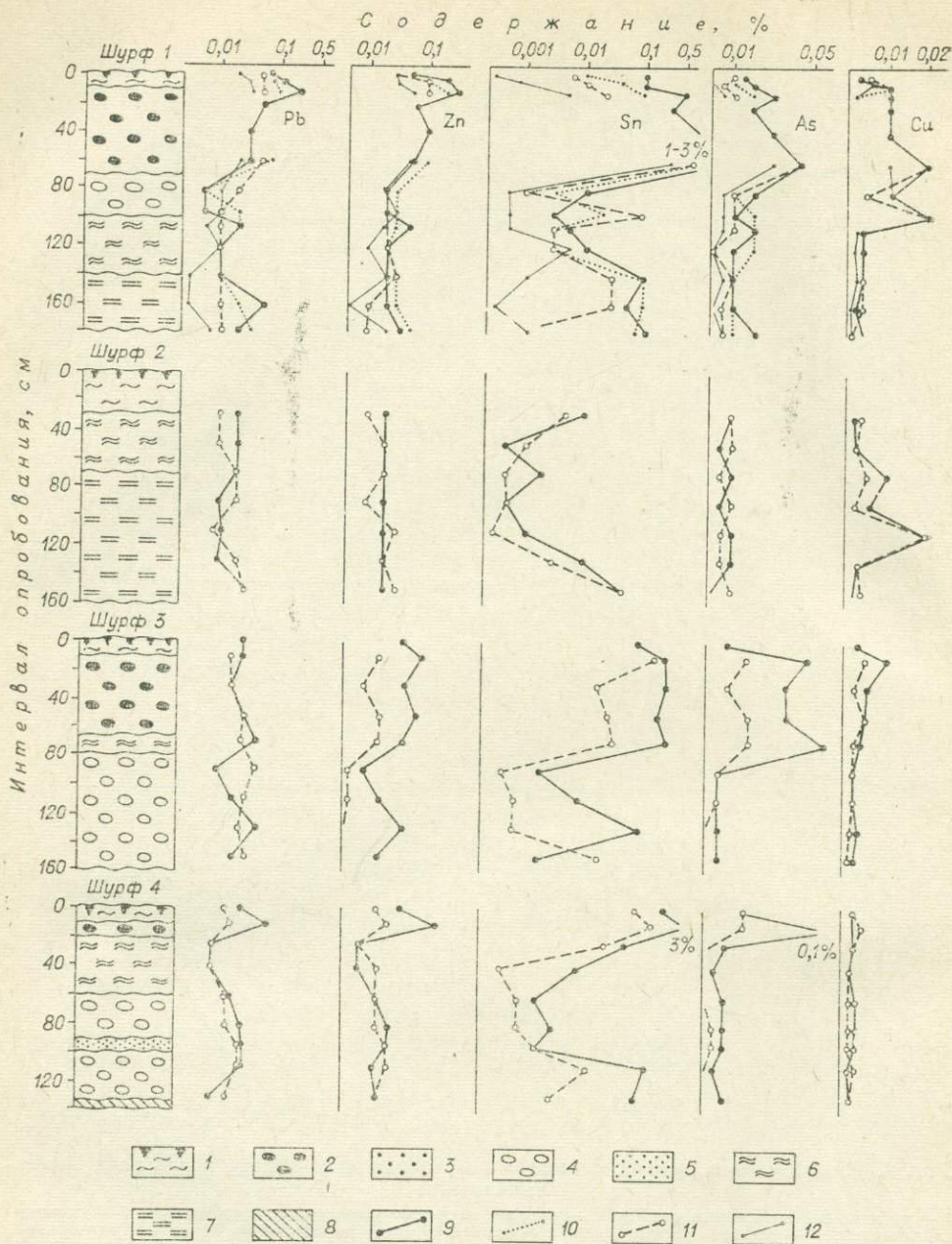


Рис. 5. Распределение рудных элементов по вертикальному разрезу отложений в верхней части потока рассеяния пади Малая Хапчеранга.

1 — почва с корнями растений; 2 — насыпной грунт с обломками пород и руд из горных отвалов; 3 — материал эфелей обогатительной фабрики; 4 — гравийно-галечные речные отложения; 5 — речной песок; 6 — песчано-илистые отложения с примесью обломков пород (пойменная фация); 7 — гравелистый суглинок; 8 — коренные породы; 9—12 — графики концентраций элементов во фракциях (мм): 9 — < 0,5; 10 — 0,5—1; 11 — 1—3; 12 — 3—5.

слоев смешанного гравийно-суглинистого состава (шурфы 1, 2, 7, 8). Характерная закономерная ориентировка в них слабоокатанных обломков удлиненной стороной по направлению течения реки говорит об отложении материала этого слоя из водного потока с медленным течением.

В других шурфах (3—6) русловые отложения представлены обычным гравием и галечником, иногда с прослоями песка. На них и гравелистом суглинке (шурфы 1, 2, 7, 8) залегает пойменная фация, в той или иной

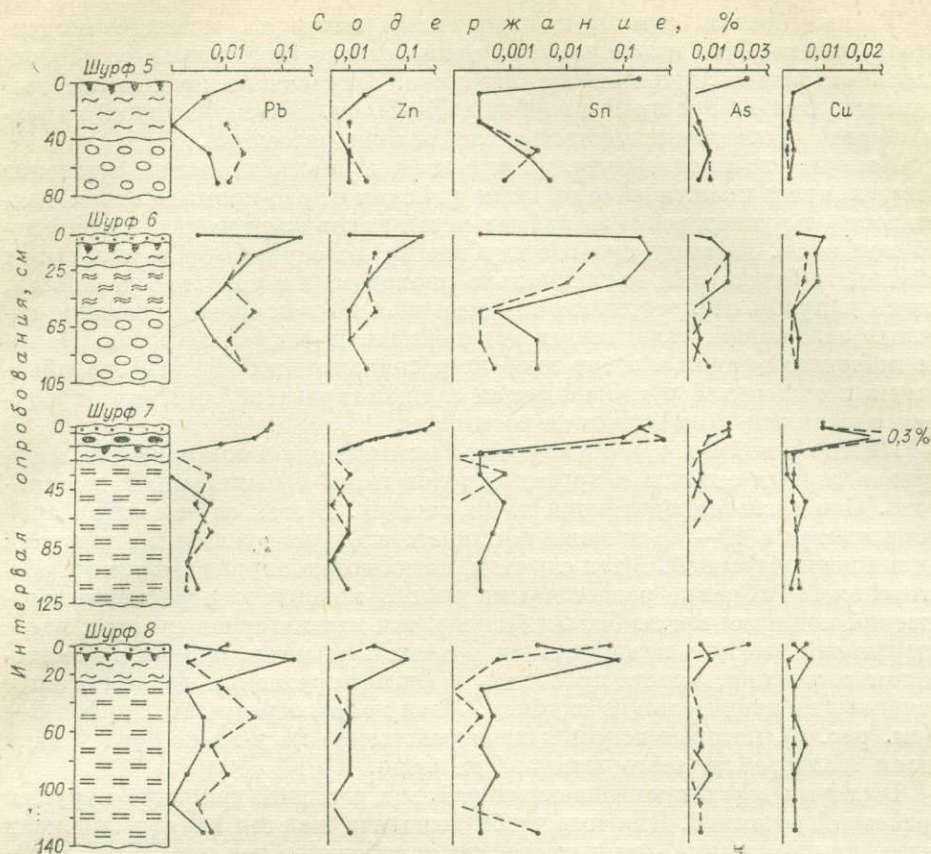


Рис. 6. Распределение рудных элементов по вертикальному разрезу отложений нижней части потока рассеяния пади Малая Хатчеранга. Усл. обозн. см. на рис. 5.

мере переработанная почвенными процессами. Насыпные образования с рудными обломками присутствуют в шурфах 1, 3, 4 и 7. Они располагаются главным образом на пойменной или, если последняя срезана (шурф 1), на русловой фации и заканчиваются сверху небольшим по мощности слоем новообразованной почвы. На интервале шурфов 6—8 поверхность поймы пади повсеместно покрыта материалом эфелей обогатительной фабрики. Хотя мощность эфелей здесь значительна (до 2 м), вблизи активного русла они почти полностью смыты. Поэтому в разрезах шурфов слой материала эфелей не превышает нескольких сантиметров.

Самым характерным элементом потока рассеяния пади Малая Хатчеранга, присутствующим в нем в небольших концентрациях, является олово. Как видно из рис. 5, 6, насыпные слои рудного материала из стволов и присутствующий на поверхности материал эфелей выделяются в шурфах высокими содержаниями (0,1—0,5, иногда 3%) этого металла. Отчетливо повышены здесь также содержания других характерных для месторождения элементов (Pb, Zn, Cu, As). По шурфам 6—8 глубина проникновения в аллювиальные отложения загрязнения от этих техногенных образований составляет 20—30 см. Глубина загрязнения от насыпных слоев в шурфах 1, 3, 4 не вполне ясна. О загрязнении аллювия под этими слоями можно судить по тому, что в местах, где имеется насыпной грунт (шурфы 1, 3, 4) содержания элементов в аллювии больше, чем в тех случаях, когда он отсутствует (шурфы 2, 5).

Резкое повышение содержания олова по направлению вниз, к плотике в шурфах 1—4, обусловлено наличием на этом интервале пади в аллювиальных отложениях и россыпи касситерита (рис. 4).

Таким образом, суммируя изложенный материал, можно констатировать, что глубина проникновения техногенного загрязнения в аллювиальные отложения, как правило, невелика. Загрязнение почти полностью снимается при отборе проб с глубины 40—50 см. Ниже указанной глубины обычно обозначаются естественные потоки рассеяния.

Конечно, за многие годы, десятилетия, а иногда столетия, в течение которых продолжается в отдельных районах горно-промышленная деятельность, в руслах рек и на поймах могут накопиться наносы значительной мощности. Поэтому пробы с глубины целесообразно брать в обрывах пойменного берега или из специально проходимых закопшек на поймах, причем в пробы отбирается мелкий материал из заполнения гравийно-галечных отложений, залегающих под пойменной фацией аллювия. Наличие пойменной фации и отбор проб из расположенных под ней гравийно-галечных отложений русловой фации служат гарантией того, что опробуются отложения в естественном состоянии.

Иногда в поймах рек образуются насыпные слои, состоящие из материала горных отвалов и других отходов горно-промышленной деятельности. Они легко определяются по их составу. В этом случае отбор проб производится в 40—50 см ниже насыпного слоя, из русловых отложений под пойменной фацией. В тех случаях, когда пойма покрыта хвостами обогатительной фабрики, разнесенными рекой, мощность загрязненных отложений под ними может быть и больше, так как материал хвостов, часто содержащий высокие концентрации рудных элементов, будучи в измельченном состоянии, может проникать с фильтрующими водами в виде суспензии на значительную глубину. Хотя нами по разрезам шурфов 6—8 (см. рис. 6), которые вскрыты непосредственно на участке эфелей пади Малая Хапчеранга, этого замечено не было.

В старых горно-промышленных районах аллювий рек часто нарушен отработкой россыпей. Для того чтобы выяснить, как это влияет на поиски по потокам рассеяния, нами проведено опробование рек некоторых золотоносных районов Восточной Сибири, в которых обрабатывались россыщи золота.

В качестве примера на рис. 7 показаны результаты опробования одной из таких рек. Дрaжная обработка россыпи в ней начинается с верховий, непосредственно от рудной зоны. Заметим, что за более чем вековую историю этого месторождения россыпь здесь перемывалась много раз и разными способами. Поэтому аллювий данной реки вплоть до окончания россыпи полностью перемешан.

Как следует из рис. 7, первый максимум концентраций элементов, проявляющихся в самом начале потока рассеяния, связан с золоторудной зоной месторождения. Указанные очень высокие величины концентраций, особенно золота, серебра и мышьяка, обусловлены сильным техногенным загрязнением русловых отложений сбрасываемыми в реку шлаками действующей обогатительной фабрики, расположенной немногим ниже рудной зоны, а также рудным материалом из отвалов многочисленных горных выработок, находящихся здесь на склонах. Ниже этого участка, на протяжении примерно 6 км, происходит закономерное затухание потока рассеяния.

Заметим, недалеко от впадения правого притока реки возникает отчетливый второй максимум концентраций элементов. Особенно резко здесь повышаются содержания вольфрама в крупном материале. Максимум золота также более четко выражен в крупном материале, хотя и в илистой фракции ($<0,5$ мм) он тоже ясно виден. Кроме вольфрама и золота, повышенные содержания на данном участке реки дают серебро, мышьяк и свинец.

Максимум приурочен к нижней части россыпи, где состояние аллювиальных отложений не отличается от вышележащего участка, где концентрации этих элементов понижались. Эта аномалия новая, источник ее

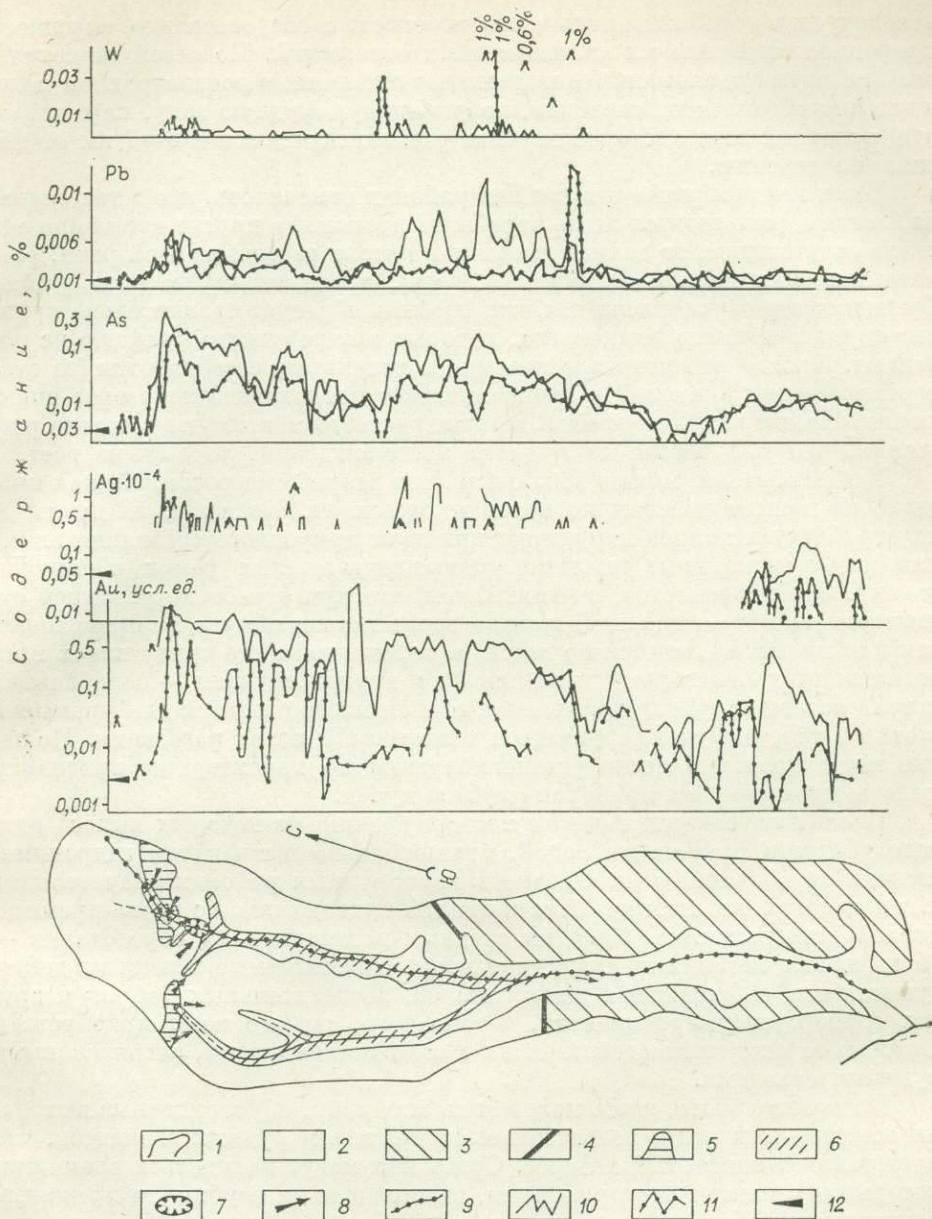


Рис. 7. Поток рассеяния реки, в которой производилась дражная отработка золотоносной россыпи.

1 — современные аллювиальные отложения (Q_4); 2 — песчано-сланцевая толща (P_2); 3 — филлиты, кварцево-слюдистые сланцы (D_3-C_1); 4 — разломы; 5 — золоторудная зона; 6 — россыпи золота; 7 — шламоборник; 8 — направление сноса материала в долину; 9 — точки опробования русловых отложений с поверхности; 10, 11 — графики концентраций элементов во фракциях (мм): 10 — < 0,5; 11 — 3—5; 12 — среднее фоновое содержание элементов.

неизвестен. Пространственно он расположен вблизи контакта между песчано-сланцевой толщей перми и филлитами с кварцево-слюдистыми сланцами девона — карбона. Учитывая, что аномалия проявляется на фоне богатого техногенного потока рассеяния, распространяющегося от основной рудной зоны месторождения, можно полагать, что источник ее должен быть значительным по величине.

Надо заметить, что аналогичные как по геохимической специфике, так и по контрастности аномалии отмечаются в правом притоке этой реки (см. рис. 7) и в соседней, расположенной к востоку от первой, где также

неоднократно обрабатывались россыпи золота, а следовательно, нарушено природное состояние их аллювиальных отложений. По своей геологической позиции эти аномалии соответствуют аномалии в рассмотренной реке, и все они обозначают, очевидно, новую единую рудную зону, параллельную основной зоне месторождения и располагающуюся в 6—7 км от нее вниз по течению.

Нами неоднократно и в разных районах отмечалось, что в тех случаях, когда в реке ведется лишь отработка россыпи, а другие источники металла отсутствуют, то данная россыпь в потоке рассеяния этой реки, развивающемся в мелкой фракции (<1 мм), практически не фиксируется. Очевидно, это обусловлено тем, что россыпь образует сравнительно крупные зерна полезного компонента, которые в опробуемую фракцию не попадают. Иногда на интервале россыпи в результате ее обработки (за счет перемешивания аллювия) в аллювии может происходить некоторое повышение концентраций элементов, но контрастного максимума в потоке рассеяния, что получается от рудного месторождения, россыпь не дает.

Таким образом, можно заключить, что разработка россыпей, как правило, не мешает поискам по потокам рассеяния. Несмотря на дражную их отработку и полное нарушение при этом природного состояния аллювия, новые аномальные участки и рудные зоны в таких реках обнаруживаются. Это объясняется, очевидно, тем, что при отработке россыпей существенного перемещения материала вдоль потока обычно не происходит, так как промывка ведется на месте, а перемещение его снизу вверх приводит лишь к некоторому усилению (а в других случаях — ослаблению) потока рассеяния. Если добываемая горная масса сводится для промывки в одно место, то будет развиваться техногенный поток рассеяния. Но такие места довольно легко устанавливаются по характерным признакам работы промывочных приборов (отвалы и т. п.)

Поиски глубокозалегающих месторождений, из которых вынос рудного вещества происходит водой, целесообразно вести путем гидрохимического опробования рек. Однако в горнорудных районах значительная часть выявленных этим методом аномалий будет связана с горно-промышленной деятельностью. Один из главных источников их образования — обогащенные металлами рудничные воды, сбрасываемые в реки из действующих или заброшенных шахт, штолен, обогатительных фабрик и других горнорудных предприятий. Кроме того, речные воды приобретают металлы за счет взаимодействия их с отложениями реки, загрязненными рудными отходами.

Но помимо этого, здесь могут быть аномалии, обусловленные выходами естественных вод с повышенным содержанием рудных элементов, что представляет поисковый интерес. Среди них могут находиться аномалии, которые обозначают месторождения, залегающие на глубине, и прежними поисковыми работами были пропущены. Поэтому, несмотря на сильно развитое техногенное загрязнение речных вод в горно-промышленных районах, при опробовании их целесообразно все-таки использовать гидрогеохимический метод с опробованием всех рек.

Основная задача при интерпретации получаемых результатов гидрохимических поисков в горно-промышленных районах будет заключаться в том, чтобы отделить естественные аномалии в водах от техногенных. Последние определяются визуально, путем обследования участка водосборного бассейна, где обнаружена аномалия, на наличие в его пределах объектов горно-промышленной деятельности (шахты, штольни, шлакоотборники и т. д.), способных загрязнять здесь опробуемую воду. Те аномальные воды, которые нельзя объяснить загрязнением, будут отражать природное явление, возможно, связанное с новым месторождением.

Институт геохимии

и.м. академика А. П. Виноградова СО АН СССР, г. Иркутск

ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНЫХ ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Основоположник геохимии В. И. Вернадский одним из первых обосновал положение о всеобщем рассеянии химических элементов, которое в дальнейшем было использовано при разработке различных геохимических методов поисков полезных ископаемых. В теоретическом обосновании, развитии и внедрении этих методов большое значение имеют многочисленные работы Н. И. Сафронова (1971), который разработал многие вопросы теории формирования вторичных ореолов и потоков рассеяния. На основе геохимических методов открыт ряд рудных месторождений в различных регионах нашей страны и за рубежом.

Роль геохимических методов поисков особенно резко возросла в наши дни, когда фонд легкооткрываемых месторождений неуклонно сокращается и все более остро ставится задача обнаружения глубокозалегающих рудных тел. В этих условиях особое значение приобретает гидрогеохимический метод поисков, который получил широкое развитие во второй половине нашего столетия.

Вместе с тем поиски глубокозалегающих месторождений гидрогеохимическим методом слабо разработаны теоретически, поэтому возникает много вопросов, связанных с условиями обогащения вод рудообразующими элементами, формами их миграции в водах, гидрогеологических условиях проявления аномальных участков, методах их выделения и т. д. Все это ставит перед гидрогеохимией новые задачи, требующие разработку соответствующих методов их решения. Цель данной работы — осветить в сжатой форме только некоторые из таких проблем.

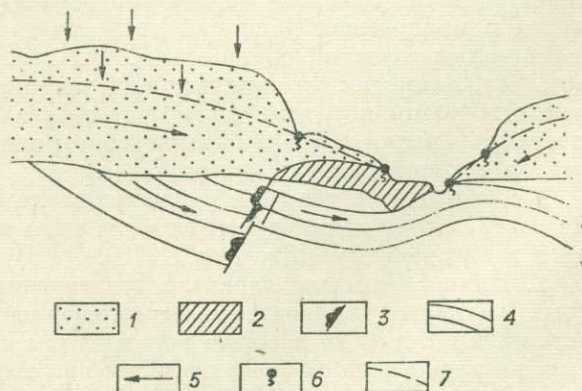
Для того чтобы лучше понять те новые задачи, которые возникают перед поисковой гидрогеохимией, рассмотрим хотя бы схематично модель формирования водного потока рассеяния в районе скрытого оруденения.

Известно, что геологические условия формирования и залегания водных потоков рассеяния рудных тел весьма разнообразны [Голева, 1968], и в небольшой статье нельзя все их рассмотреть. Поэтому возьмем только один пример, изображенный на рис. 1. Такие условия формирования водных потоков рассеяния наблюдаются, например, в ряде районов Колывань-Томской складчатой зоны, где проводились исследования проблемной гидрогеохимической лабораторией ТПИ.

Представленная схема позволяет, как нам кажется, выявить некоторые общие положения формирования вторичного ореола и потока рассеяния для скрытого месторождения, которые сводятся к следующему.

Рис. 1. Схема формирования водного потока рассеяния в районе скрытого оруденения.

1 — рыхлые перекрывающие осадки; 2 — рудомещающие коренные породы; 3 — рудное тело; 4 — водный поток рассеяния; 5 — направление движения подземных вод; 6 — родники подземных вод; 7 — уровень подземных вод.



К рудному телу поступают подземные воды, уже имеющие тот или иной химический состав, определяемый конкретными геолого-гидрогеологическими и ландшафтно-климатическими условиями, включая, естественно, и все микрокомпоненты в фоновых количествах.

Взаимодействие воды с рудным телом может происходить в разнообразных геохимических условиях: окислительных, глеевых, восстановительных, кислых, щелочных. В зависимости от этого характер взаимодействия воды с рудами будет различным. Здесь возможны процессы растворения, выщелачивания, химического, электрохимического, микробиологического окисления, катионного обмена и т. д. Кроме того, время взаимодействия воды с рудами резко меняется в зависимости от конкретных геолого-структурных и гидрогеологических условий, что ведет к разной степени обогащения вод рудообразующими элементами.

На всем пути своего движения (до рудного тела, в его пределах и после него) подземные воды взаимодействуют с горными породами, не только вмещающими руду, но и другого состава. Чаще всего такими породами оказываются алюмосиликатные или карбонатные. Степень взаимодействия контролируется интенсивностью водообмена, длиной пути движения воды, существующей геохимической обстановкой и т. д.

Рудные элементы, оказавшиеся в растворе, в конечном итоге попадают в геохимическую среду, которая контролируется не влиянием рудного тела, а параметрами фоновых вод и водовмещающих пород, характером возникающих геохимических барьеров и, конечно, их миграционной способностью в конкретных условиях, формами миграции.

Все сказанное показывает, что применительно к скрытым и глубокозалегающим месторождениям формирование водного потока рассеяния контролируется не только влиянием самого рудного тела, но и той обстановкой, которая формируется в фоновых водах, их составом, средой, характером взаимодействия с водовмещающими породами и многими другими факторами.

Следовательно, теория формирования водных потоков рассеяния должна базироваться прежде всего на законах формирования состава подземных вод в целом. Сделанный вывод, хотя и не нов, но в практике гидрогеохимических поисков он не получил должного развития и применения [Голева, 1968, 1978; Методическое руководство..., 1973]. Поэтому приходится останавливаться на этом вопросе. Сложность проблемы заключается в том, что при поисках нельзя ограничиваться общими вопросами формирования состава подземных вод, а требуется знать совершенно конкретно, как формируются воды на том или ином участке исследуемой территории, какие породы и в каком количестве служат источниками химических элементов и в чем конкретно выражается влияние рудных тел.

Решение поставленных задач возможно только на базе изучения особенностей взаимодействия воды с горными породами и рудами применительно к конкретным условиям геологической, геохимической и ландшафтно-климатической обстановкам. Опыт наших исследований показывает, что, несмотря на кажущуюся простоту, вопросы взаимодействия воды с горными породами далеки от своего окончательного решения и многие положения должны быть пересмотрены. В первую очередь это относится к алюмосиликатным породам.

Проведенные в этом направлении исследования позволили выявить ряд особенностей взаимодействия воды с алюмосиликатами, которые сводятся к следующему [Шварцев, 1978].

1. Инконгруэнтный характер растворения алюмосиликатов и некоторых силикатов приводит к формированию равновесно-неравновесной системы, в которой вода всегда неравновесна с первичными алюмосиликатами, но равновесна с образующимися при этом вторичными продуктами. Вследствие этого подземные воды растворяют горные породы на всем пути

своего движения и концентрируют в растворе подвижные элементы, количество которых поэтому в водах колеблется в значительных пределах в зависимости от конкретной обстановки и масштабов растворения водой горных пород. Именно поэтому фоновые воды в разных рудниках на одной и той же площади часто содержат разные количества рудообразующих элементов [Удодов и др., 1962].

2. Система вода — порода является обменной, т. е. вода всегда растворяет одни минералы с одновременно образует новые на всем этапе своего взаимодействия с породой. При этом малоподвижные элементы связываются формирующимися вторичными продуктами, а подвижные концентрируются в растворе до определенного предела. Начиная с некоторого момента, и часть подвижных связывается вторичной фазой. Вследствие этого даже подвижные элементы не полностью концентрируются в водах. Отсюда и отсутствие связи между содержанием микрокомпонентов и общей минерализацией подземных вод [Методическое руководство..., 1973].

3. Во вторичных образованиях элементы концентрируются в соотношениях и количествах, отличных от исходной породы. Количество связываемых элементов контролируется геохимической обстановкой, типом образующегося вторичного соединения, его структурой, миграционной способностью элемента и т. д., а не концентрацией элемента в исходном рудном теле. Поэтому при оценке запасов месторождения по вторичному ореолу необходимо учитывать условия его образования.

4. Растворение алюмосиликатов происходит при непосредственном участии газов, органических веществ, продуктов диссоциации воды и часто разнообразных бактерий. Все это необходимо учитывать при изучении источников химических элементов в водах.

5. Характер взаимодействия воды с горными породами постоянно меняется. По мере концентрирования химических элементов в растворе меняется химический потенциал системы, в частности pH и Eh, иногда температура. Поэтому на первых этапах взаимодействия воды с породой состав вторичных продуктов один, и они связывают определенный комплекс элементов, затем состав вторичных образований меняется, что влечет изменение и комплекса связываемых элементов. Убедительное доказательство сказанному мы находим в явлениях вертикальной зональности кор выветривания, в смене состава продуктов выветривания от водораздела к долинам рек, ландшафтных особенностей территории [Перельман, 1968].

Таким образом, с позиций теории эволюции характера взаимодействия воды с горными породами, газами и органическим веществом, открываются новые перспективы в изучении механизма формирования ореолов и потоков рассеяния.

Естественно, однако, что нельзя понять механизм формирования водного потока, изучая только взаимодействие воды с горными породами, так как источником аномального количества элементов в водном потоке всегда служит рудное тело. Поэтому, разумеется, изучение механизма взаимодействия воды с рудными минералами — важнейшая задача. В этом отношении хотелось бы обратить внимание исследователей на следующие вопросы.

Механизм обогащения воды рудными компонентами связан главным образом с процессами окисления, классически разработанными в свое время академиком С. С. Смирновым. Это направление, применительно к гидрогеохимическим поискам, разрабатывалось А. А. Бродским (1964), П. А. Удодовым и др. (1962), Г. А. Голевой (1968) и другими исследователями. Процессы окисления, как известно, требуют участия свободного кислорода, но ведь в глубоких водах он часто отсутствует. Более того, С. С. Смирнов считал, что зона окисления развивается только выше уровня грунтовых вод, т. е. в зоне аэрации, а ниже зоны колебания уровня грун-

товых вод располагается зона вторичного обогащения. С этим, однако, вряд ли можно согласиться, тем более, что в последнее время выявлены так называемые зоны пластового окисления, которые развиваются в условиях глубокого водоносного горизонта [Перельман, 1968]. Поэтому вопрос об условиях развития нижней границы зоны окисления не может считаться решенным окончательно.

Имеются и другие неясные проблемы. Так, процессы окисления обычно связывают со свободным кислородом, а в продуктах окисления с помощью изотопов обнаруживают кислород из молекулы воды. Возникает вопрос: не может ли сама вода в определенных условиях являться окислителем для сульфидов? Много неясного и с формированием явно современных зон окисления в областях криогенеза, которые могут служить прекрасным объектом при изучении этих вопросов.

Большое значение в развитии окислительных процессов имеют и микроорганизмы, роль которых еще недостаточно изучена. В последние годы этот вопрос активно разрабатывается проблемной гидрогеохимической лабораторией ТПИ. В результате проведенных исследований установлено, что все горные породы, содержащие органическое вещество и воду, всегда содержат сложную гамму микроорганизмов. Последние обнаружены также в поровых растворах. При этом оказалось, что микрофлора поровых растворов обладает даже более высокой биологической активностью, чем соответствующие микроорганизмы свободных вод. Это, вероятно, обусловлено специфическим характером геохимической обстановки поровых растворов.

Биологическая активность микрофлоры поровых вод изучалась в лабораторных условиях путем сравнительного анализа скоростей чисто химического и химико-биологического окисления разнообразных сульфидных руд в условиях различных сред. В результате установлено значительное превышение скоростей бактериального выщелачивания над химическим. Так, опыт выщелачивания цинковой руды культурой микроорганизмов, выделенной из поровых растворов глинистых образований в районе г. Томска и выращенной на модифицированной среде Летена, показал, что за 7 суток при участии микроорганизмов в раствор перешло в 4 раза больше цинка, чем в опыте без микроорганизмов [Удодов и др., 1970; Трифонова и др., 1975].

Проведенными исследованиями в полевых условиях установлено, что в свободных и поровых водах Зыряновского месторождения (Рудный Алтай) широко развиты биоценозы авто- и гетеротрофных микроорганизмов, способствующих активному выщелачиванию сульфидов. При этом в потоках рассеяния обнаруживается, как минимум, две зоны. В одной из них преобладают химические процессы, а в другой — биохимические. Это отчасти вызвано тем, что процессы химического окисления сульфидных минералов обычно предшествуют развитию биохимического выщелачивания руд. Зоны, где наиболее сильно выражены биохимические процессы, характеризуются повышенным содержанием тяжелых металлов в водах. Такие зоны прослеживаются чаще всего на участках повышенной трещиноватости, тектонической нарушенности и в коре выветривания.

Поровые воды участков активных биохимических процессов отличаются низкими значениями рН (1,5—3,0), активным развитием микрофлоры, резким изменением кислотно-щелочных условий среды при переходе от одной микрзоны к другой. Поэтому по величине рН поровых вод, измеряемому без их отжатия, можно судить о наличии участков с активным биохимическим окислением руд. Последнее, в частности, было установлено в эксплуатируемых карьерах Зыряновского месторождения.

Участки химического и биохимического окисления по глубине образуют сложные взаимопереходы, так как по отдельным зонам тектонических нарушений на большие глубины проникают воды, несущие свободный кислород, что способствует развитию окислительных процессов. Поэтому

соотношение масштабов химического и бактериального окисления остается не вполне выясненным.

Из всего сказанного становится совершенно очевидным, что требуется дальнейшее развитие теории окислительных процессов.

Другой важнейший процесс обогащения вод рудными компонентами — явление электрохимического растворения сульфидных руд, которое наиболее полно освещено в работе Г. Б. Свешникова (1967). Роль электрохимического растворения в обогащении вод рудообразующими элементами была, в частности, установлена Н. М. Рассказовым (1963) в пределах Бутрахтинского сульфидно-арсенидного месторождения в других случаях. Следует, однако, отметить, что изучение этого вопроса пока ограничивается исследованием физической сущности самого явления. В то же время масштабы данного явления, условия его проявления, ареалы распространения остаются невыясненными. Поэтому истинная роль электрохимических процессов в формировании водных потоков рассеяния в настоящее время не может быть оценена окончательно.

В этой связи следует подчеркнуть, что с глубиной в бескислородной зоне содержания рудообразующих элементов в водах сульфидных месторождений, как правило, резко снижается [Удодов и др., 1962; Голева, 1968; Методическое руководство..., 1973], что говорит об относительно небольшой роли процессов электрохимического растворения. В то же время электрохимические реакции способствуют явлениям окисления сульфидных руд, что неоднократно подчеркивалось А. С. Семеновым (1962). В этом отношении интересны работы, выполненные в Австралии [Thornber, 1972; Nickel, Thornber, 1977]. В работах указанных исследователей проблема электрохимического растворения связывается с катодным восстановлением кислорода в грунтовых водах верхней зоны месторождения и анодным окислением руд в нижней части месторождения. Такой подход к явлениям электрохимического растворения представляется заслуживающим внимания.

Перешедшие в раствор в результате тех или иных процессов химические элементы не остаются на месте, а вовлекаются в водный цикл миграции и перераспределения. Важнейшую роль при этом играет подвижность микрокомпонентов, которая определяется физико-химическими свойствами самого элемента, формами его миграции, характером геохимической обстановки и конкретными гидрогеологическими условиями.

Не останавливаясь подробно на всех этих вопросах, достаточно полно изложенных в ряде работ [Удодов и др., 1962; Перельман, 1973; Методическое руководство..., 1973; Голева, 1977; Шварцев, 1978; и др.], отметим, что применительно к микрокомпонентам большую роль играют прежде всего формы их миграции. В последние годы в этом направлении проведены большие работы, однако вопрос далек от своего окончательного решения. В частности, как показали, например, исследования на некоторых глубоководных месторождениях юга Западной Сибири, в пределах гидрогеохимических аномалий преобладают органоминеральные формы миграции химических элементов, способствующие переносу на значительные расстояния даже малоподвижных элементов, включая Ti, V, Cr, Ni, Co и др.

Второе обстоятельство, которое следует отметить, связано с тем, что в настоящее время изучается преимущественно относительная подвижность химических элементов, в то же время при поисках важно знать, как изменяется миграционная способность по всей длине водного потока в условиях химического взаимодействия вод рудного месторождения с фоновыми, смешения вод различного химического типа, изменения геохимической и гидрогеологической обстановки, наличия геохимических барьеров разнообразной природы. Все это требует новых методов оценки геохимической подвижности химических элементов [Шварцев, 1978].

Формирование водных потоков рассеяния определяется также характером той обстановки, которая существует в пределах месторождения. Среди природных обстановок важнейшими, по А. В. Щербакову (1968), являются геологоструктурная, стратиграфическая, фациально-литологическая, минералогическая, геоморфологическая и гидродинамическая, гидрохимическая, термодинамическая и геохимическая. Сочетание этих факторов определяет конкретные условия формирования водного потока, его размеры, характер строения, зональность и гидрогеологические условия проявления на дневной поверхности.

Изменение с глубиной характера всех перечисленных обстановок определяет, как правило, зональный характер формирующихся водных потоков рассеяния. Так, применительно к рудным месторождениям юга Западной Сибири установлено, что для участков глубокого залегания рудных тел отмечается развитие своеобразных геохимических типов подземных вод. В них резко сокращается содержание сульфатов и уменьшается общая минерализация, повышается рН. Одновременно происходит понижение концентрации микрокомпонентов по сравнению с верхними зонами исследуемых месторождений, хотя эти концентрации и остаются выше фоновых вод для района в целом. Например, подземные воды участков глубокого залегания в пределах Бутрахтинского месторождения содержат следующие количества микрокомпонентов (мкг/л): Cu — 33, Zn — 110, Pb и Ag — 1, Ni — 4, Co — 8, As — 20. По предварительным данным, в водах глубоких горизонтов Зырянского месторождения понижается содержание органических и металлоорганических соединений.

В отдельных случаях не выходящие на поверхность рудные тела имеют очень слабые водные потоки рассеяния, которые без детального анализа могут быть пропущены. Пример этого — водные потоки месторождения Светлый Ключ, расположенного в Кузнецком Алатау.

Грунтовые воды рассматриваемого месторождения имеют два уровня стока: один верхний, определяемый базисом дренирования мелких ручьев, второй, более глубокий, — базисом дренирования р. Томь (рис. 2). Все это приводит к интенсивному водообмену и слабому проявлению водного потока рассеяния, особенно в пределах верхней зоны дренирования. Поэтому в начальный период гидрогеохимических исследований, когда чувствительность методики недостаточно высока, водный поток рассеяния был пропущен. И только при повторном опробовании, после применения более совершенных методов гидрогеохимического анализа, этот водный поток рассеяния обнаружился.

Иные условия характерны для грунтовых вод более глубокого стока, которые дренируют глубокие части рудного тела. В этих условиях формируется довольно контрастный легко обнаруживаемый водный поток рассеяния по скважинам и родникам, расположенным на низких гипсометрических отметках.

Еще более сложная картина формирования водных потоков рассеяния наблюдается в случае, когда в пределах месторождения встречаются сероводородные воды, что, например, характерно для Кадамжайского сурьмяного месторождения. Как показали исследования Н. М. Шварцевой (1972), в таких условиях миграционная способность большей части

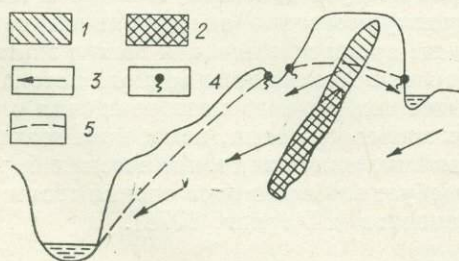


Рис. 2. Водный поток рассеяния месторождения Светлый Ключ.

1 — выщелоченные окисленные сульфидные руды и вторичные карбонаты меди; 2 — слабоокисленные сульфидные медные руды; 3 — направление движения грунтовых вод; 4 — источник грунтовых вод; 5 — уровень грунтовых вод.

химических элементов резко уменьшается, в то время как часть из них, например сурьмы, резко возрастает. Все это приводит к формированию своеобразной гидрогеохимической зональности.

Приведенные данные показывают, что проблема формирования водных потоков рассеяния глубокозалегающих месторождений сталкивается с решением большого комплекса разнообразных вопросов применительно к конкретным геолого-структурным особенностям исследуемой территории. Поэтому требуется разработка с новых позиций многих вопросов взаимодействия воды с горными породами и рудами. Первый опыт таких региональных исследований изложен в работе С. Л. Шварцева (1978).

Таким образом, хотя в настоящее время можно считать доказанной возможность выявления гидрогеохимическим методом рудных месторождений под чехлом рыхлых образований в различных ландшафтно-климатических зонах нашей страны [Голева, 1978], однако разработка теории формирования водных потоков рассеяния, без чего невозможно эффективное использование метода, требует постановки специальных опытно-методических исследований применительно к конкретным рудным районам.

*Томский политехнический институт,
г. Томск*

Г. Б. СВЕШНИКОВ

О ПОИСКАХ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО СОЛЕВЫМ, ВОДНЫМ И ГАЗОВЫМ ОРЕОЛАМ

Повышение эффективности геохимических поисков глубокозалегающих полезных ископаемых представляет важную и актуальную задачу. При этом большое значение приобретают исследования солевых и газовых ореолов элементов-индикаторов, на существование которых впервые обратил внимание Н. И. Сафронов (1936). Весьма плодотворной явилась идея Н. И. Сафронова об образовании наложенных солевых и газовых ореолов на участках месторождений полезных ископаемых, перекрытых аллохтонными образованиями. Последующее развитие этой идеи привело к важным теоретическим и методическим обоснованиям поисков глубокозалегающих руд цветных и редких металлов геохимическими методами, эффективность которых была подтверждена открытием ряда рудных месторождений в различных районах СССР.

Необходимыми предпосылками для разработки теории геохимических поисков глубокозалегающих полезных ископаемых являются представления об образовании вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов рудных месторождений в глубинных условиях, ниже зоны выветривания. В этих условиях могут возникать наложенные литохимические водные и газовые ореолы.

Установлено, что в результате разнообразных процессов — взаимодействия воды и породы, электрохимических явлений, действия анаэробных бактерий — вокруг рудной залежи создаются повышенные концентрации элементов, входящих в состав руд. Эти элементы могут путем диффузии и фильтрации достигать дневной поверхности и тем самым являться индикатором глубокозалегающих рудных тел. Наибольший практический интерес, с точки зрения поисков этих полезных ископаемых, представляют водные ореолы широкого круга элементов, газовые ореолы ртути в почвенном и атмосферном воздухе, сорбированные и гуматно-фульватные формы нахождения микроэлементов в верхних горизонтах геологического разреза.

При образовании водных ореолов в глубинных условиях определенное значение имеют реакции, связанные с наличием свободной серной кислоты, поступающей из верхней зоны окисления при инфильтрации вод. На сульфидных месторождениях эти реакции протекают по схемам, детально описанным еще в 1936 г. С. С. Смирновым.

Одной из причин образования солевых ореолов в глубинных условиях являются естественные электрохимические процессы, протекающие на границе руд, обладающих электронной проводимостью, с вмещающей ионной средой. Как известно, электроннопроводящая рудная залежь представляет собой естественный гальванический элемент, условиями существования которого являются наличие высокой электрической проводимости и различие в химическом составе вод, циркулирующих на разных глубинах. Катод этого элемента, как правило, располагается в верхней части залежи. В частности, на медноколчеданных месторождениях он пространственно совпадает с зоной вторичного обогащения. Анодная часть элемента отвечает области распространения первичных руд. Первичные руды подвергаются анодному растворению, которое приводит к обогащению окружающих вод ионами тяжелых металлов.

Кроме гальванического элемента, охватывающего целиком рудную залежь, существенное значение в образовании глубинных солевых ореолов имеют локальные («микрогальванические») элементы, образующиеся вследствие различия величин электродного потенциала электроннопроводящих минералов, слагающих отдельные участки поверхности рудного тела. В результате работы «микрогальванических» элементов происходит электрохимическое растворение относительно электроотрицательных минералов и обогащение окружающей среды ионами металлов, входящих в состав этих минералов. Благоприятными условиями образования солевых ореолов электрохимического происхождения являются полиминеральный состав руд и непрерывная циркуляция вод, оказывающая деполяризующее воздействие на «микрогальванические» элементы. Экспериментально установлены факты электрохимического растворения полиметаллических, медно-никелевых, медно-молибденовых, кобальт-арсенидных руд. При этом растворы обогащаются ионами свинца, цинка, никеля, молибдена, кобальта, входящих в состав минералов, имеющих относительно низкие величины электродного потенциала. Содержание этих ионов в воде находится в зависимости от величины разности потенциалов минералов, составляющих «микрогальванический» элемент. Электрохимическое растворение руд происходит как при свободном доступе воздуха, так и при отсутствии его в кислых, нейтральных и щелочных средах [Свешников, 1967].

Определенную роль в образовании солевых ореолов ниже зоны выветривания играют и биогеохимические процессы, связанные с жизнедеятельностью бактерий. При этом наибольший интерес представляют анаэробные тионовые бактерии (*Thiobacillus denitrificans*), которые могут окислять сульфиды на глубинах 400 м и более [Белякова и др., 1962].

В глубинных условиях возможно возникновение газовых ореолов рудообразующих элементов, в частности ртути. В этом случае пары ртути выделяются из первичных сульфидных руд за счет термического воздействия (возгонки), окисления сульфидов ртути углекислотой, путем восстановления киновари водородом, углеводородами [Карасик и др., 1971, 1973]. При наличии электроннопроводящего минерала метациннабарита может происходить электрохимическое восстановление по схеме: $\text{HgS} + 2e \rightarrow \text{Hg}^0 + \text{S}^{2-}$.

Химические элементы вторичных ореолов, образовавшихся в глубинных условиях, в дальнейшем мигрируют к земной поверхности в результате диффузии, инфильтрации подземных, поровых вод, диффузии газов по зонам трещиноватости и пористых сред. В масштабе геологического времени процессы миграции элементов с определенной глубины до земной поверхности могут достигнуть стационарного состояния, и тогда concentra-

ция рудного вещества в любой точке ореола не будет изменяться во времени. Расчеты В. С. Голубева [Голубев, Гарибянц, 1968] показывают, что дальность вертикальной миграции элементов может составлять 300—500 м.

При наличии гипергенных геохимических барьеров [Перельман, 1968] происходит накопление элементов в приповерхностной зоне и возникают наложенные ореолы в рыхлых образованиях, почвах на участках глубокозалегающих рудных месторождений.

При благоприятных гидрогеологических условиях на земной поверхности может происходить разгрузка подземных вод, обогащенных рудными элементами, в частности за счет процессов электрохимического растворения и биохимического разложения первичных руд. На сульфидных месторождениях водные ореолы химического и электрохимического происхождения должны различаться по своим особенностям. Так, в результате процессов химического окисления сульфидных руд образуются водные ореолы меди, железа, цинка на полиметаллических, медноколчеданных месторождениях; меди, никеля, железа — на медно-никелевых; меди, железа, молибдена — на медно-молибденовых месторождениях. Воды участков месторождений имеют преимущественно сульфатный состав, пониженные значения рН, устойчивые повышенные значения окислительно-восстановительного потенциала (Еh), обусловленного наличием в растворе системы Fe^{3+}/Fe^{2+} .

Водные ореолы электрохимического происхождения характеризуются повышенными содержаниями свинца и цинка — на полиметаллических месторождениях; никеля — на медно-никелевых; молибдена (MoO_4^{2-}) на медно-молибденовых месторождениях; медь и железо во всех случаях имеют подчиненное значение. Содержание в водах ионов SO_4^{2-} недостаточно для образования заметных ореолов рассеяния сульфат-ионов. Общий химический состав вод участка месторождения почти не изменяется по отношению к среднему химическому составу вод района; значения рН вод также остаются постоянными. Величины Еh плохо воспроизводятся из-за отсутствия в растворах буферных окислительно-восстановительных систем, в частности системы Fe^{3+}/Fe^{2+} .

При одновременном проявлении процессов химического окисления и электрохимического растворения сульфидных руд образуются водные ореолы смешанного происхождения. Эти ореолы характеризуются повышенными содержаниями тяжелых металлов и сульфат-иона, при этом свинец, цинк, никель, молибден в водах в большинстве случаев преобладают над медью и железом, несмотря на обратные соотношения этих металлов в рудах. Воды участков месторождений имеют гидрокарбонатно-сульфатный или сульфатно-гидрокарбонатный состав. В случае вод малой минерализации может отмечаться некоторое понижение значений рН. Величины Еh, благодаря наличию в водах несколько повышенного содержания железа, воспроизводятся удовлетворительно.

Водные ореолы электрохимического происхождения могут быть зафиксированы в условиях слабого развития процессов химического окисления в зоне выветривания коренных пород, на участках глубокого залегания сульфидных руд.

Весьма важным индикатором глубокозалегающих полезных ископаемых являются газовые ореолы, в частности газовые ореолы рассеяния ртути. Последние могут отмечаться на земной поверхности на участках сульфидных месторождений, в пределах зон глубинных разломов, перекрытых аллохтонными отложениями мощностью 300—400 м и более [Фурсов, 1977].

Наложённые литохимические, водные и газовые ореолы, связанные с глубокозалегающими полезными ископаемыми, могут изучаться на всех этапах и стадиях геокартировочных, поисковых и разведочных работ. Однако выбор рациональной методики проведения геохимических поисков

существенно зависит от масштаба планируемых работ, ландшафтно-геохимических условий региона, экономичности исследований.

В закрытых районах с гумидным климатом при геологических съемках в м-бе 1 : 200 000—1 : 100 000 наиболее целесообразно применение гидрохимического метода в комплексе с воздушными и наземными вариантами геофизических съемок.

В закрытых районах аридной зоны, где естественные водопункты часто отсутствуют, следует рассмотреть возможности атмосфернохимических методов, основанных на определениях элементов-индикаторов в атмосферном воздухе.

При поисках в м-бе 1 : 50 000—1 : 25 000 на закрытых территориях, где мощность осадочных пород и рыхлых дальнепринесенных отложений превышает 15—20 м, в условиях гумидного климата наиболее эффективен и экономичен гидрохимический метод. Он в данных условиях отличается большой экономичностью, универсальностью применения, высокой производительностью. Благодаря наличию относительно больших размеров водных ореолов по площади, можно ограничиться довольно редкой сетью опробования, например 1,6—2,5 водопункта на 1 км² площади. При этом гидрохимическую съемку целесообразно сочетать с грави- и магниторазведкой в м-бах 1 : 50 000—1 : 25 000. В данных случаях область распространения геологического объекта, обуславливающего появление водных ореолов, устанавливается по результатам гравиметровой и магнитной съемок.

В частности, в условиях Карело-Кольского региона потенциально никеленосные массивы основных и ультраосновных пород четко оконтуриваются положительными гравиметровыми и магнитными аномалиями, которые сопровождаются гидрохимической аномалией по никелю, меди, кобальту, сульфат-иону и отношению Mg/Ca [Свешников и др., 1977].

Эффективность указанной комплексной методики, где видное место занимает гидрохимический метод, подтверждается обнаружением новых рудных зон с содержанием никеля, а также ранее неизвестных зон сульфидного оруденения.

В закрытых районах с аридным климатом можно рекомендовать применение атмосфернохимической съемки, в частности по ореолам ртути в нижних слоях атмосферы. Для этого целесообразно использовать вариант атмосфернохимической съемки, предложенный сотрудниками Ленинградского университета [Свешников и др., 1974, 1975] и основанный на прямых оптических атомно-абсорбционных определениях паров ртути непосредственно в слое воздуха.

Измерения производятся с помощью установки, состоящей из двух автономных блоков: источника резонансного излучения, газортутной лампы с блоком питания и приемника излучения, включающего узкополосный интерференционный фильтр, пропускающий ультрафиолетовое излучение резонансной линии ртути $\lambda = 2537 \text{ \AA}$, высокочувствительный солнечнослепой ФЭУ и регистрирующее устройство. Оба блока включают в себя оптическую систему взаимного наведения. Общий вес блоков установки 8 кг. Расстояние между источником и приемником может быть различным—от 1 до 100 м и более. Чувствительность определений при базе 20 м составляет $2 \cdot 10^{-9}$ вес. %.

При наличии паров ртути в анализируемом слое воздуха происходит явление атомной абсорбции, выражающееся в изменении величины фототока. Чем меньше значение фототока, тем выше концентрация определяемой газообразной ртути в слое воздуха.

Экспериментальная проверка указанного метода и макетов аппаратуры, разработанных в Ленинградском университете, была успешно проведена в Центральном Казахстане, Средней Азии, Восточном Забайкалье, Башкирии на различных месторождениях полезных ископаемых. Установлена возможность обнаружения паров ртути в нижних слоях атмосферы.

ры, обусловленных геологическими объектами, залегающими на глубинах до 1,5—2 км.

В аридных районах на закрытых площадях атмосферическую съемку целесообразно сочетать с гидрохимической съемкой с опробованием водоносных горизонтов, вскрываемых картировочными и опорными скважинами и с литохимическим опробованием керна, отбираемого на контакте рыхлых отложений и коренных пород.

На этапе детальных поисков (м-б 1 : 10 000—1 : 5000 и крупнее) выявленные геохимические аномалии, связанные со вторичными ореолами глубокозалегающих месторождений, обследуются сорбционно-солевым (или почвенно-геохимическим) методом в комплексе с геофизическими методами.

Сорбционно-солевая съемка предусматривает изучение конкретных форм нахождения элементов-индикаторов, составляющих наложенный литохимический ореол в различных вытяжках из проб рыхлых отложений, отобранных из представительного горизонта [Свешников и др., 1972; Са-ет, 1976].

Опыт применения сорбционно-солевой съемки в комплексе с геофизическими методами показывает высокую эффективность поисков глубокозалегающих рудных месторождений в закрытых районах. В частности, в Атасуйском районе Центрального Казахстана полиметаллические и железо-марганцевые месторождения перекрываются далекопринесенными третичными глинами, мощность которых достигает 30—50, а в отдельных случаях 100 м и более. С поверхности эти глины перекрыты чехлом (2—7 м) слабообводненных эоловых песков, а подстилаются мезозойской корой выветривания, мощность которой на отдельных участках достигает первых сотен метров. В этих условиях на одном из участков гидрохимические исследования (Л. Я. Тененбаум) позволили выявить серию аномалий с повышенными содержаниями цинка, свинца и серебра в водах. В результате последующей сорбционно-солевой съемки была установлена группа сопряженных геохимических аномалий по марганцу, меди, свинцу, барью, серебру, образующих почти непрерывную зону протяженностью около 9 и шириной до 1,0—1,5 км.

В дальнейшем детальные работы сорбционно-солевым методом в комплексе с методом вызванной поляризации позволили выбрать места для заложения буровых скважин. Первые же скважины вскрыли промышленные свинцовые руды, залегающие на глубинах 66—180 м [Свешников и др., 1971; Ларионов, Свешников, 1977].

В ландшафтно-геохимических условиях Карело-Кольского региона, где потенциально никеленосные ультраосновные породы часто перекрыты мощной толщей моренных отложений, устанавливается общее повышение содержаний никеля, кобальта, магния, железа в сорбционно-солевом комплексе наложенных ореолов, развитых в моренных отложениях [Нежданова и др., 1974]. При этом содержания никеля существенно преобладают над содержаниями меди (на участках шпирит-пирротинового оруденения наблюдается обратное соотношение: медь всегда преобладает над никелем).

При отсутствии техногенного заражения площади достаточно четкие результаты в индикации глубокозалегающих полезных ископаемых дает изучение гуматно-фульватных форм нахождения элементов в гумусовых горизонтах почвенного покрова [Антропова, 1975].

Сорбционно-солевою (или почвенно-геохимическую) съемку при детальных работах целесообразно сочетать с опробованием паров ртути в почвенном воздухе по методике ИМГРЭ [Фурсов, 1977].

Таким образом, поиски глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых по наложенным литохимическим, водным и газовым ореолам рассеяния достаточно эффективны.

Однако опыт поисковых работ по этим ореолам в закрытых районах еще невелик. Поэтому необходима постановка дальнейших теоретических,

методических и экспериментальных исследований по проблеме поисков глубокозалегающих рудных месторождений применительно к конкретным ландшафтно-геохимическим условиям.

*Ленинградский университет им. А. А. Жданова,
г. Ленинград*

**В. С. КОМАРОВ, А. П. ЛОПАТКИНА, А. Г. АНДРЕЕВ,
А. Н. СЕРГЕЕВ, О. Д. БОЙКО, В. А. ВЬЮШИН**

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ ПО РЕЧНОЙ СЕТИ

Развитие представлений Н. И. Сафронова об ореолах рассеяния рудных месторождений привело к разработке многочисленных модификаций геохимических съемок, суть которых состоит в обнаружении на различных стадиях поисковых работ признаков рассеяния вещества в твердой, жидкой и газообразной фазах.

Важное место в арсенале созданных методов занимают рекогносцировочные геохимические съемки по потокам рассеяния. Основы их были заложены еще в 40-х годах работами Е. А. Сергеева (1946) и получили дальнейшее развитие в трудах Н. В. Квашневской (1957), В. В. Поликарпочкина и других (1958), А. П. Соловова (1960), Х. Е. Хокса [Хокс, Уэбб, 1964] и других исследователей.

Новый этап в развитии рекогносцировочных геохимических методов наступил в начале 60-х годов, когда были разработаны мелкомасштабные варианты гидрогеохимических съемок, нацеленных на оценку национальных ресурсов рудных полезных ископаемых. Метод региональных гидрогеохимических поисков на основе систематического опробования поверхностных водотоков и водоемов получил широкое развитие в СССР, США, Канаде, Италии, африканских и других странах [Лопаткина и др., 1972; Arendt e. a., 1977; Armour-Brown, Nichol, 1970; и др.]. Размах этих работ подтверждает программа, принятая в 1975 г. в США, она предусматривает проведение двухэтапного опробования речного стока на территории 2 500 000 км² в течение 5 лет [Arendt и др., 1977].

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА И ОБЛАСТЬ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Гидрогеохимические поиски по речному стоку — высокопроизводительный и недорогой вид работ, обладающий вместе с тем достаточной геологической эффективностью и глубиной. Опробование вод и отложений гидросети проводится на стадии рекогносцировочных поисков по редкой сети наблюдения — от 8—10 до 100 точек на 1000 км². Назначение метода состоит в оценке рудоносности больших территорий (площадь в тысячи, десятки и сотни тысяч квадратных километров) и выделении рудных провинций, поясов, районов и узлов, проявляющихся в виде областей аномальных концентраций химических элементов в системе поверхностных водотоков и водоемов.

Основным условием успешного применения гидрогеохимической съемки речной сети является ее разветвленность, достаточная для равномерного освещения исследуемой территории. Наиболее благоприятны в этом отношении горные, среднегорные районы и расчлененные плато гумидной климатической зоны, для которых характерна активная денудация склонов, густая сеть рек и ручьев, дренирующих грунтов, трещинные и пластово-трещинные воды горных массивов.

В северных лесных районах с избыточным увлажнением (Канада, Финляндия, Карельская АССР), благодаря развитой системе озер, опробование поверхностных вод и озерных осадков также эффективно в качестве рекогносцировочно-поискового метода.

В равнинных и засушливых областях аридной зоны плотность и обводненность гидрографической сети уменьшаются, снижается значение подземного стока в питании поверхностных вод и замедляется поступление обломочного материала с водосборных площадей, вследствие чего условия применения метода ухудшаются.

Гидрогеохимические поиски по речной сети проводятся прежде всего на малоисследованных территориях, где сравнительно высока вероятность обнаружения новых рудных узлов, районов и провинций, однако известные горнорудные районы с неравномерной геохимической изученностью также служат ареной для постановки подобных работ.

Комплексное гидро-литохимическое опробование гидросети позволяет оценивать металлоносность площадей на широкий круг элементов. В поверхностных водах исследуются элементы, склонные к устойчивой водной миграции (Mo, As, F, SO₄ и др.) и образующие выдержанные аномалии в жидкой фазе поверхностного стока. Менее устойчивые водные мигранты (Pb, Sn, Cu и др.) изучаются в твердом стоке.

Гидрогеохимическая съемка речного стока является составной частью геолого-прогнозных работ м-ба 1 : 1 000 000—1 : 200 000. Как показывает опыт зарубежных исследователей, хорошие результаты дает сочетание ее с аэрогеофизическими съемками, которые выполняются на площадях развития аномалий в речном стоке. Естественным продолжением региональных геохимических поисков при работах в более крупных масштабах являются съемки по литохимическим потокам и ореолам рассеяния, а также гидрохимические съемки по водным источникам.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ И МЕТОДИКИ РАБОТ

В СССР имеется опыт проведения гидрогеохимической съемки по речной сети в м-бе 1 : 1 000 000—1 : 500 000 с плотностью опробования одна точка отбора на 50—120 км² и в м-бе 1 : 200 000 с плотностью опробования одна точка на 10—30 км²*

Выбор масштаба съемки (и плотности опробования) определяется задачами поисковых работ, густотой гидросети и степенью сложности геологического строения территории. В общем случае гидрогеохимические поиски м-ба 1 : 1 000 000—1 : 500 000 используются для оценки металлоносности крупных регионов размерами десятки — сотни тысяч квадратных километров. Работы в м-бе 1 : 200 000 проводятся на аномальных площадях, выделенных по данным мелкомасштабного гидрогеохимического опробования, а также для оценки отдельных геологических структур площадью тысячи — десятки тысяч квадратных километров. Весьма целесообразно включать в контур съемки известные рудные районы и узлы. Это позволяет получить необходимые материалы, характеризующие проявленность указанных рудных объектов в речном стоке исследуемой территории.

При работе в м-бах 1 : 1 000 000—1 : 500 000 ведется приустьевое опробование речек и ручьев протяженностью от 5 до 50 км; в более крупном масштабе опробуются основные русла и притоки малых рек шагом

* Возможность отнесения геохимических съемок, проводимых с указанной плотностью опробования, к м-бу 1 : 200 000 является спорной. Согласно другой точке зрения целесообразно относить съемку с плотностью одна точка на 5—10 км² к м-бу 1 : 500 000, с меньшей плотностью — к м-бу 1 : 1 000 000, а съемка м-ба 1 : 200 000 требует опробования с плотностью одна точка на 1 км².

4—5 км. Наиболее рациональным следует считать комплексное исследование территорий на все возможные типы рудных месторождений.

Гидрогеохимические поиски по речному стоку основаны на широком использовании транспортных средств: автомашин, вездеходов, катеров и моторных лодок, а в труднодоступных районах — вертолетов.

В каждой точке опробования отбираются одна водная проба и две пробы отложений водотоков.

Для анализа водных проб на микроэлементы используются высокочувствительные химические методы, позволяющие получать значащие результаты в области гидрохимического фона. Помимо этого, производится спектральный анализ сухих остатков, определяется рН вод, их химический состав и общая минерализация (по удельному электрическому сопротивлению). Литохимические пробы анализируются на широкий круг элементов спектральным методом; с целью увеличения контрастности производится спектральный анализ термомагнитной фракции литохимических проб; при необходимости применяются специальные методы анализа, например на золото.

При использовании автомашин бригада, состоящая из двух человек — оператора и водителя, — может заснять за полевой сезон в зависимости от плотности опробования, состояния дорожной сети и климатических условий от 10 000 до 60 000 км² территории. Стоимость 1 км² съемки в м-бе 1 : 500 000—1 : 100 000, включая аналитические определения, обработку и интерпретацию, колеблется от 50 коп. до 3 руб.

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Применявшаяся в наших работах обработка результатов съемки речного стока включает определение фоновых и пороговых (минимальных) аномальных значений содержания элементов.

Данные гидрохимического опробования представляются в виде содержания элементов в воде, отнесенного к ее общей минерализации, что обусловлено необходимостью учета влияния ландшафтной обстановки. Значительные площади, закрываемые гидрохимическими съемками, не бывают однородными по ландшафтно-геохимическим условиям, от которых зависит содержание многих элементов в воде. К числу подверженных этой зависимости относятся основные компоненты минерализации вод: кальций, магний, натрий, сера, хлор, гидрокарбонат-ион, а из микроэлементов — молибден, мышьяк, фтор и другие устойчивые водные мигранты. В гумидной климатической зоне содержание рудных элементов данной группы в поверхностных водах находится в прямой пропорциональной зависимости от суммы растворенных солей, а их содержание в минеральном остатке вод отличается значительным постоянством в области гидрохимического фона и зависит главным образом от особенностей распределения элементов в породах.

Фоновые концентрации элементов в гидро- и литохимических пробах определяются статистически по результатам съемок в заведомо безрудных относительно этих элементов регионах. При обработке данных литохимического опробования следует ориентироваться также на кларк элементов в породах. Определенные таким образом фоновые концентрации принимаются едиными для всех исследуемых регионов как с известной, так и неизвестной металлогенической специализацией, что позволяет сравнивать металлоносность, рудонасыщенность отдельных разобщенных территорий. В качестве примера распределения элементов на безрудных площадях приведем данные по содержанию фтора в речных водах Украины (684 пробы):

Содержание фтора в минеральном остатке воды, %	0,025—0,05	0,05—0,1	0,1—0,2	0,2—0,4
Число проб, %	2,2	40,3	56,6	0,9

Результаты гидрохимического опробования изображаются в виде построенных на геологической основе карт распределения элементов в минеральном остатке вод, на которых содержания разделены по градациям, охватывающим весь диапазон наблюдаемых значений. При построении карт область гидрохимического фона может входить в одну градацию. Например, для фтора при пороговом аномальном значении 0,2% принимаются градации: $\leq 0,2$; 0,2—0,4; 0,4—0,8 и т. д. В некоторых случаях, когда изменения гидрохимического фона фтора по площади представляют интерес, диапазон фоновых концентраций делится на более дробные интервалы: 0,025—0,05; 0,05—0,1; 0,1—0,2 и т. д.

На картах результатов опробования выделяются аномальные площади, размеры которых могут колебаться от небольших, соответствующих водосборной площади одного водотока, до обширных, включающих водосборы десятков рек и ручьев. Как показали методические исследования, известные рудные районы, пояса и провинции образуют аномальные поля рассеяния, измеряемые соответственно сотнями, тысячами и десятками тысяч квадратных километров. Контрастность таких аномалий обычно невелика: от 2 до 5 значений геохимического фона, и лишь в отдельных водотоках их интенсивность может достигать 10—20-кратного превышения над фоном.

Области фоновых содержаний элементов в минеральном остатке вод и в русловых отложениях рассматриваются как малоперспективные для дальнейших поисков промышленных месторождений. Опыт работ показывает, что площади, характеризующиеся фоновым содержанием элементов в речном стоке, чаще всего являются безрудными, однако в отдельных случаях они могут заключать в себе рудопроявления, а при неблагоприятных для поисков по гидросети гидрогеологических и ландшафтных условиях — даже отдельные месторождения (обычно непромышленные). В то же время известные рудные узлы, районы, пояса и провинции во всех случаях проявляются аномалиями в речном стоке.

Аномальные площади после проведения детализации рекомендуются для постановки более крупномасштабных работ. Предполагается, что в формировании аномалий в речном стоке участвуют большие объемы горных пород, несущих повышенные содержания рудных элементов. К числу источников гидрогеохимических аномалий в речном стоке относятся: а) комплексы магматических пород, обогащенных отдельными элементами; б) тектонические нарушения, несущие непромышленную минерализацию, либо являющиеся каналами разгрузки глубинных вод с аномальной концентрацией рудных элементов; в) многочисленные рудопроявления, характерные для рудных районов; г) рудные месторождения.

Значительные по размерам аномалии в речном стоке могут являться результатом совокупного воздействия указанных объектов.

Опыт показывает, что наиболее обширные аномальные поля рассеяния образуют фтор, бор, сера, мышьяк. По-видимому, это объясняется высокой миграционной способностью летучих компонентов в гидротермальном процессе, в результате чего они минерализуют значительные объемы горных пород. Для олова, свинца, меди и некоторых других элементов характерны меньшие по размерам аномалии, локализирующие площадь развития соответствующей рудной минерализации.

Остановимся несколько подробно на результатах изучения отдельных элементов в речном стоке некоторых регионов страны.

МЫШЬЯК В РЕЧНЫХ ВОДАХ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Исследованная территория Западного Забайкалья составляет около 95 000 км². На этой площади отобрано 760 проб, взятых в устьях водотоков, относящихся к бассейнам рек Уда, Хилок, Чикой, Ингода, Джиды и оз. Байкал (рис. 1).

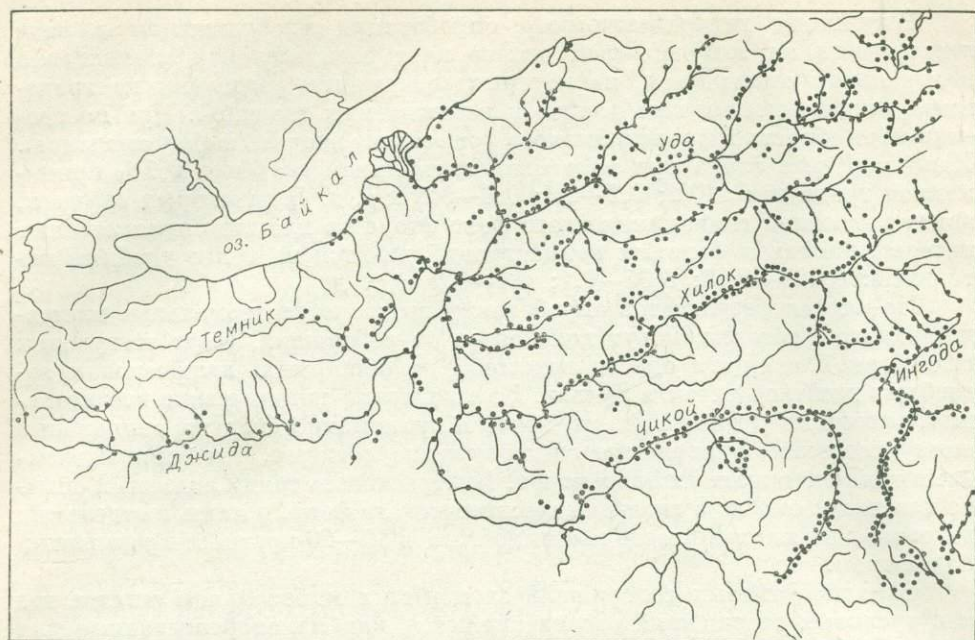


Рис. 1. Схема опробования гидросети. Кружки — точки опробования.

В исследованном районе мышьяк сравнительно редко образует собственные месторождения. Значительно чаще он сопровождает золотое и оловянное оруденение, поэтому распределение мышьяка на территории Западного Забайкалья в определенной мере отражает особенности распределения месторождений этих двух элементов. В пределах Западного Забайкалья (рис. 2) оловянная, олово-вольфрамовая и золоторудная минерализация проявились главным образом в герцинской складчатой области и совершенно не характерны для байкальской и каледонской складчатых областей (Джидинский рудный район составляет исключение).

По результатам опробования речного стока байкальская и каледонская складчатые области характеризуются весьма низкими, фоновыми значениями мышьяка в минеральном остатке речных вод. Значительными по площади, интенсивными аномалиями выделены Зачикойская горная страна и Даурия, входящие в область герцинской складчатости (см. рис. 2; табл. 1). Граница распространения аномалий мышьяка в речном стоке проявляется достаточно четко и контрастно по среднему течению р. Чи-

Таблица 1

Распределение мышьяка в минеральном остатке речных вод складчатых областей Западного Забайкалья

Содержание As, 10^{-4} %	Число проб, %	
	Байкальская каледонская зона (всего 620 проб)	Герцинская зона (всего 150 проб)
1—5	91	—
5—10	8	16
10—25	1	15
25—50	—	25
50—100	—	30
100—250	—	8
250—1000	—	6

Таблица 2

Содержание мышьяка в реках Западного Забайкалья

Река	Длина реки, км	As, 10^{-4} %
Уда	523	1,4
Хилок	840	2,8
Темник	200	2,9
Джидда	567	3,2
Чикой	769	21,0
Ингода (г. Чита)	400	16,0
Онон	1000	25,7

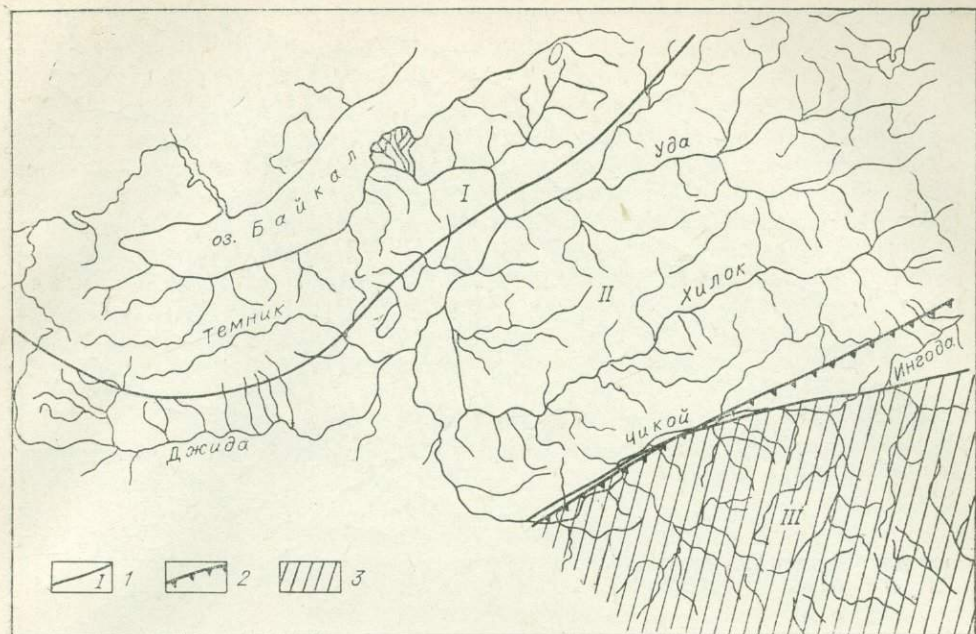


Рис. 2. Мышьяк в речных водах Западного Забайкалья.

1 — складчатые области: байкальская (I), каледонская (II), герцинская (III); 2 — область распространения оловянно-вольфрамовой и золоторудной минерализации; 3 — область распространения повышенных содержаний мышьяка в речных водах.

кой. Все правые притоки реки несут здесь низкие ($\leq 5 \cdot 10^{-4}\%$) содержания мышьяка, тогда как содержание его в левых притоках в 5—10 раз превышает фон.

Контрастность распределения мышьяка в различных частях Западного Забайкалья находит свое отражение даже в больших реках этого региона (табл. 2).

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что реки, дренирующие зону каледонской складчатости (Уда, Хилок, Темник, Джида), характеризуются содержаниями мышьяка, не превышающими $3,2 \cdot 10^{-4}\%$; в реках Зачикойского и Даурского районов содержание мышьяка резко возрастает.

ФТОР В РЕЧНЫХ ВОДАХ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Западное Забайкалье — один из флюоритоносных районов Советского Союза [Булнаев, 1976]. Флюоритовые месторождения Западного Забайкалья характеризуются простым, преимущественно флюоритовым и кварц-флюоритовым составом, молодым (посленижнемеловым) возрастом, приуроченностью к крупным разломам, отсутствием выраженной связи с магматизмом, эпитермальными условиями формирования. По всем этим признакам они имеют много общего с флюоритовыми месторождениями Монголии и Китая, с которыми они объединяются в единую Центрально-Азиатскую флюоритоносную провинцию. На территории Западного Забайкалья Центрально-Азиатская провинция выходит Забайкальским флюоритовым поясом, имеющим протяженность около 1000 км и ширину 250—300 км (рис. 3). В структурном отношении Забайкальский флюоритовый пояс приурочен к зоне каледонской складчатости, интенсивно активизированной герцинскими и мезозойскими движениями, он представлен Джи-

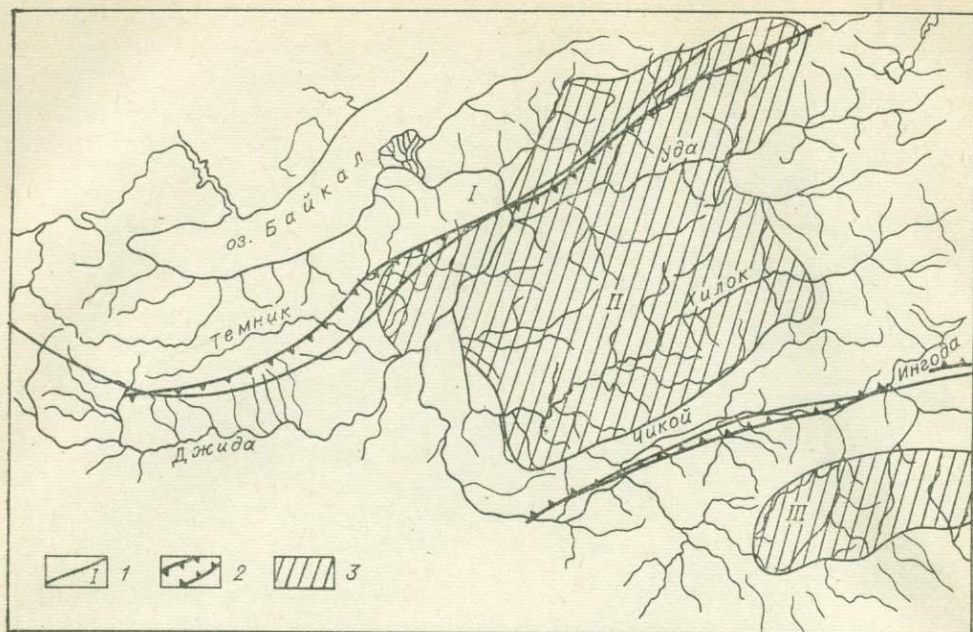


Рис. 3. Фтор в речных водах Западного Забайкалья.

1 — складчатые области: байкальская (I), каледонская (II), герцинская (III); 2 — Забайкальский флюоритовый пояс; 3 — область распространения аномальных содержаний фтора в речных водах ($\geq 0,3\%$).

да-Витимской, Тугнуй-Кондинской, Хилокской и Чикой-Ингодинской рудными зонами. В пределах Забайкальского пояса сосредоточена основная масса флюоритовых месторождений Западного Забайкалья.

Металлогеническая специализация Западного Забайкалья относительно фтора находит свое выражение в результатах гидрохимического опробования речного стока. Содержание фтора в минеральном остатке речных вод Западного Забайкалья изменяется в широких пределах от 0,05 до 3,2% (760 проб):

Содержание фтора в минеральном остатке речных вод, %	Число проб, %	Содержание фтора в минеральном остатке речных вод, %	Число проб, %
0,05—0,1	5	0,4—0,8	33
0,1—0,2	13	0,8—1,6	3
0,2—0,4	45	1,6—3,2	1

Ориентируясь на распределение фтора в речных водах регионов, лишенных флюоритовой минерализации, в качестве фонового было принято содержание $\leq 0,2\%$. В Западном Забайкалье также концентрации встречаются не более чем в 18% отобранных проб.

В пределах Забайкальского флюоритового пояса выделена гидрохимическая аномалия фтора площадью около 70 000 км², по интенсивности в 2—20 раз превышающая фон (см. рис. 3). Преобладающее содержание фтора в минеральном остатке вод составляет здесь 0,3—0,6%. Меньшая по площади, но достаточно интенсивная аномалия выделена также в верховьях рек Чикой и Ингода. К северу от рудного пояса, на территории байкальской складчатой области, и к юго-востоку, в области проявления герцинской складчатости, содержание фтора снижается.

Таким образом, распределение фтора в речном стоке Западного Забайкалья отчетливо отражает размещение флюоритовой минерализации на этой территории.

**СВИНЕЦ
В РУСЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЗАБАЙКАЛЯ**

Не менее информативным в поисковом отношении оказывается распределение рудных элементов в твердой фазе речного стока. В качестве примера рассмотрим особенности распределения свинца в русловых отложениях двух различных районов: Приаргунского и Уда-Хилокского. Приаргунье является районом развития свинцово-цинкового оруденения, здесь известны промышленные месторождения и многочисленные рудопроявления свинца и цинка. В пределах этого района были опробованы бассейны Урулюнгя, Верхней Борзи, Средней Борзи, Нижней Борзи, а также малые реки, впадающие в Аргунь. В Уда-Хилокском районе, не содержащем свинцово-цинковой минерализации, опробовались бассейны Хилка, Тугнуя, Уды, Итанцы.

В табл. 3 приведено распределение содержания свинца в русловых отложениях. В качестве фонового принято содержание свинца $\leq 10 \cdot 10^{-4}\%$, установленное в 94,5% проб, взятых в Уда-Хилокском районе. В Приаргунье число таких проб составляет всего 34%, остальные пробы русловых отложений несут аномальное содержание свинца и охватывают площадь, соответствующую областям распространения свинцово-цинковой минерализации.

Таблица 3

Распределение свинца в русловых отложениях

Содержание Pb, $10^{-4}\%$	Число проб, %		Содержание Pb, $10^{-4}\%$	Число проб, %	
	Приаргунский район (всего 175 проб)	Уда-Хилокский район (всего 370 проб)		Приаргунский район (всего 175 проб)	Уда-Хилокский район (всего 370 проб)
3	—	14,6	30	29	5,5
3	3,4	49,7	100	26,8	—
10	31	30,2	300	7,4	—
			1000	2,4	—

Иногда при интерпретации оказываются полезными элементы, не имеющие промышленного значения на площади поисков. Например, высокая концентрация никеля может быть обусловлена неминерализованными ультраосновными породами, сульфидной минерализацией или тем и другим.

Кроме карт распределения содержания отдельных элементов при интерпретации могут быть использованы карты аддитивных или мультипликативных полей, построенных для групп генетически близких элементов (например, Pb, Zn, As, Ag; Sn, W, As и т. п.) или более широкого комплекса элементов, характерных для гидротермального процесса. Наличие комплексных аномалий отражает основную черту эндогенных рудных провинций — большое разнообразие рудных компонентов и их комбинаций в виде различных месторождений и рудопроявлений. В сочетании с данными по отдельным элементам данные по распределению суммарных и мультипликативных полей в твердом и жидком стоке позволяют получить представление об интенсивности и особенностях гидротермального процесса в различных частях исследуемой территории.

*Научно-производственное объединение
«Геофизика», г. Ленинград*

ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ПОИСКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ДЖИДИНСКОМ РАЙОНЕ ЗАБАЙКАЛЬЯ

В последние годы природным условиям геохимических поисков и оценке достоверности опосредованности территорий различными методами уделяется серьезное внимание. Для успешного развития геохимических методов поисков в Сибири большое значение имели исследования многих советских ученых [Сафронов, 1936₂, 1957₃, 1971; Красников, 1959; Поликарпочкин, 1966, 1969, 1976; Перельман, 1973, 1975; Перельман, Шарков, 1957; Шарков, Миляев, 1973; и др.].

Нами рассмотрены условия геохимических поисков в горно-таежных ландшафтах на примере Джидинского горнорудного района — одного из старейших в Забайкалье. Металлогения района определяется широким распространением разнотипной молибден-вольфрамовой минерализации, образование которой связано с мезозойской тектоно-магматической активизацией.

Современные поисковые условия в районе определены развитием ландшафтов в кайнозой, причем наиболее важную роль сыграли такие исторические события, как неотектонические движения, излияния базальтов, врезание речных долин, аккумуляция осадков, климат.

Своеобразный этап ранней кайнозойской истории ландшафтов района связан с миоценовыми базальтами и погребенными ими осадками. Покровы базальтов бронируют водоразделы; крупные поля базальтовых лав выделяются на Купчинском плоскогорье (хр. Джидинский), в верховьях рек Утулика, Снежной, Хангарула (хребты Хангарульский и Хамар-Дабан), и в междуречье Дархинтуя, Нуда, Цакирки и Сангино [Божинский, 1941; Белов, 1963]. Мощность базальтовых лав колеблется от 100 до 400 м. Формирование базальтов связано с трещинными излияниями. В разрезе их выделяется несколько потоков, а также межбазальтовые каолинит-монтмориллонитовые коры выветривания, озерно-дельтавиальные красные щебенистые глины. Климат в это время был теплый, умеренно влажный. Верхнемиоценовые базальты погребли расчлененный рельеф с врезанными речными долинами [Антощенко-Оленев, 1975]. Междуречья были слабо расчленены. В основании покровов базальтов находятся преимущественно кварцевые галечники, дресвяники, щебни и брекчии.

В условиях горного рельефа произошел интенсивный размыв древних каолинитовых и каолинит-монтмориллонитовых кор выветривания. По аналогии с другими районами Забайкалья они имеют домиоценовый возраст и, очевидно, относятся к палеогеновому времени — главной эпохе корообразования. Влажный субтропический климат благоприятствовал процессам кислого выщелачивания верхних горизонтов кор выветривания. На молибденовых и полиметаллических месторождениях при сернокислом выщелачивании формировались зоны окисления мощностью 25—50 м, верхние горизонты которых обеднены молибденом, медью и цинком. На золоторудных рудопроявлениях, вероятно, происходило накопление золота в подзоне вторичного обогащения зон окисления.

Покровами базальтов перекрыты месторождения и их ореолы, выведенные на денудационную поверхность в домиоценовое время.

После формирования лавовых полей миоцена исходная поверхность была деформирована неотектоническими движениями. В этот период вдоль тектонических нарушений оформлялся современный рисунок речных долин бассейна Джиды и начиналось интенсивное расчленение базальтовых покровов. В результате глубокого и густого расчленения ре-

льефа на денудационную поверхность выводится большинство известных рудных месторождений Джидинского рудного района, происходит их интенсивное разрушение. В плиоцене в условиях теплого увлажненного климата — второго этапа корообразования — началось активное разрушение редкометалльных месторождений Джидинского рудного поля и формирование потоков рассеяния и россыпей вольфрама по речкам, дренирующим эти месторождения. Условия расчлененного рельефа способствовали в то время формированию золотоносных россыпей в районе. При этом важно отметить, что этапу врезания предшествовал период корообразования и формирования зон окисления рудных месторождений, благоприятствовавший мобилизации золота в пределах водосборов. Логично предположить, что основная масса этого металла поступила в речные долины в данный период.

Верхнеплиоценовый аллювий погребен долинными базальтами и подпрудными озерными отложениями. Мощность подбазальтовых галечников в долине Джиды колеблется от 10 до 30 м. К концу позднего плиоцена глубина вреза долин района стала близкой к современной.

Своеобразие развития придолинного рельефа, осадконакопления и ландшафтов связано с излиянием долинных базальтов. Излияния их произошли во многих пунктах, в условиях расчлененного рельефа с глубоко врезанными долинами рек. В бассейне р. Джиды известно несколько разновозрастных лавовых полей — Джидинский, Дархинтуйский, Хамнейский, Сангинский и Цакирский (верхний плиоцен), Бартойский, Барун-Хобольский, Хурай-Цакирский (средний — верхний плейстоцен). Общая протяженность базальтовых потоков в районе составляет 250 км. В результате лавовых излияний образовались подпрудные долинныи водоемы. В условиях степных ландшафтов расчлененного среднегорья происходило быстрое заполнение водоемов осадками. Подпрудные водоемы сформировались и по притокам р. Джиды — Цакирке, Мерген Шено, Хасурте, Шабартаю, Чемуртаю и другим, долины которых были подперты долинными базальтовыми потоками. Джидинское лавовое поле начинается выше пади Зимки и заполняет долину Джиды на протяжении 80 км. Выше верхнего бьефа базальтового потока долина Джиды превратилась в крупный подпрудный водоем длиной 35 км. В устье Прамодонкуля произошло накопление озерных илов на площади 10 км². Это глеевые илы, отлагающиеся на добазальтовом аллювии в сухом и теплом климате разнотравных степей и лесостепей. В озерах, богатых органическим веществом, развивалась восстановительная обстановка, участками она была с сероводородом. Озерные осадки представлены серыми слюдястыми алевритами, ритмично чередующимися с глинистыми песками и черными, темно- и голубовато-серыми илами с вивианитом. В пелитах илов установлен монтмориллонит с примесью гидрослюды. Илы богаты растительным детритом и имеют заметный запах сероводорода. Мощность озерных илов колеблется от 15 до 25 м. Выше они перекрываются желтовато-серыми слабожелезистыми песками с линзами галечников. Это подпрудное озеро располагалось в устье Прамодонкуля, дренировавшего Джидинские редкометалльные месторождения вольфрама и молибдена. При размыве зон окисления этих месторождений река выносила в озеро редкие элементы, которые концентрировались в илах. Так, в дельте Прамодонкуля отлагались черные озерные илы, богатые редкими элементами. После прорыва базальтовой плотины геохимическая аномалия в верхнеплиоценовых озерных илах была перекрыта средне-верхнеплейстоценовым аллювием рек Джиды и Модонкуля.

По долинам других рек подпрудные озерные отложения и их геохимия совершенно не изучены, вскрыты они одиночными скважинами.

В связи с формированием долинных лавовых полей и образованием подпрудных водоемов в бассейне р. Джиды произошло резкое нарушение характера осадконакопления. В это время происходит аккумуляция

рыхлого материала по долинам рек, сопряженных с базальтовыми потоками, что привело к захоронению и консервации верхнеплиоценовых, нижне- и среднелистоценовых отложений. Подпрудные отложения по глубоковрезанным долинам рек далеко вдаются в глубь Джидинского, Ключевского хребтов. По долине Джиды они распространены на расстоянии более 35 км, по Дархинтую, Хасурте, Шабартаю и Цикирке — 15—25 км, по Мерген Шено, Барун-Голу, Дунду-Голу и Зун-Голу — 9 км. Днища подпрудных долин широкие, плоскодонные, слаботеррасированные, где преобладает надпойменный комплекс террас. Для этих долин характерно заболачивание — развитие болот, лугов, заболоченных лесов с торфяниками и интенсивное меандрирование русла.

Появление нового местного базиса эрозии в долинах в результате излияния базальтов и образования подпрудных долин способствовало на протяжении плейстоцена усиленному накоплению рыхлых отложений — делювиально-пролювиальных и солифлюкционных — в нижних частях склонов и предгорьях, сопряженных с этими долинами. Основную часть толщ слагают обывесткованные делювиальные и пролювиальные отложения, сформировавшиеся в стешных и сухостешных ландшафтах. Особенно интенсивно аккумуляция рыхлых отложений шла в раннем плейстоцене в условиях аридизации климата вдоль левобережья Джиды и его притоков — подножия южных крутых склонов. Мощность рыхлых отложений колеблется от 20 до 70 м.

Консервация древних добазальтовых отложений продолжается и до настоящего времени. Наиболее активный врез р. Джиды и его притоков наблюдается только на участках распространения базальтовых лав, где они пропилили базальты на глубину 20—100 м. А врез же современных водотоков в подпрудных долинах и сопряженных с ними в предгорных шлейфах очень слабый, достигает 1—3 м. Следовательно, врезание рек в подпрудных долинах резко отстает от вреза их на участках базальтовых потоков.

В результате накоплений указанной полигенетической толщи в долинах бассейна р. Джиды большие площади оказались закрытыми ими. Базальтовые потоки и подпрудные отложения в долинах перекрыли древние россыпи, потоки рассеяния, а также месторождения и их вторичные ореолы на низких уровнях вдоль долин (рис. 1). Открытыми оказались верхние части склонов и водоразделы междуречий, а также останцовые сопки. Современные русловые потоки на подпрудных участках размывают озерно-аллювиальные, аллювиальные и склоновые отложения. Поступление рудного вещества со склонов в современные водотоки подпрудных долин происходит в том случае, когда зоны минерализации обнажаются в верхней части склона. В этих условиях образуются потоки рассеяния, приуроченные к верховьям рек, а также молодые верхне-плейстоценово-голоценовые шлиховые потоки и убогие россыпи золота и вольфрамита в русловых отложениях врезанных подпрудных долин и базальтовых лав, связанные с коренным источником вне зоны влияния подпрудных образований.

В условиях расчлененного среднегорья бассейна р. Джиды на формирование вторичных ореолов большое влияние оказывает экспозиция склонов

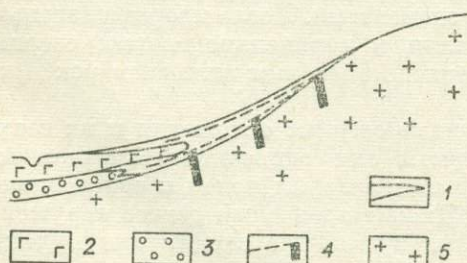


Рис. 1. Вторичные ореолы рассеяния на склонах подпрудных речных долин.

1 — склоновые отложения; 2 — базальтовые лавы; 3 — подбазальтовый аллювий; 4 — рудные тела и их вторичные ореолы; 5 — рудовмещающие породы.

и связанная с ней асимметрия долин. Особенно это четко проявляется на широтных участках долин с глубиной вреза 100—400 м. В бассейне р. Джиды проявлен южный вариант асимметрии долин [Пресняков, 1955]. Асимметрия долин здесь предопределена главным образом характером распределения солнечного тепла на склонах, что вызывает различную прогреваемость их, увлажненность, наличие мерзлоты, особенности развития склоновых процессов и деятельности руслового потока. Имеющие южную экспозицию убуры получают тепла в десятки раз больше, чем северные склоны. В летнее время на убуры солнечные лучи падают почти перпендикулярно, а на северные склоны — под малым косым углом. Такие условия распределения солнечного тепла в субширотных долинах существовали на протяжении плейстоцена. Асимметрия долин — результат саморазвития долинных геохимических ландшафтов в плейстоцен-голоцене, происходивший независимо от субстрата горных пород и выпадающих осадков. Южные склоны, крутые, короткие, без мерзлоты, заняты убурами (сухими карбонатными степями), а северные мерзлотные склоны, массивные, пологие и протяженные, закрыты мохово-торфяным покровом. Убуры широко распространены по левобережью р. Джиды и на ее притоках субширотного направления. Здесь вторичные ореолы открытые. Активно движущиеся увлажненные грунты на северных склонах постепенно смещают русловой поток к южному склону. В результате в основании убура обычно образуется крутой подрезанный скальный участок, и современный тальвег оказывается перемещенным по отношению к древнему с погребенным аллювием на 100—400 м (рис. 2).

Солифлюкционные отложения на больших площадях перекрывают северные склоны и сопряженные с ними днища речных долин Дархинтуя, Нуда, Хасурты, Уленги и др. Особенно активно солифлюкционные образования развиваются на флишеидной толще кембрия и ультраосновных породах палеозоя. Этими образованиями погребены древние россыпи и потоки рассеяния. На солифлюкционных склонах проявлен внутригрунтовый эффузионный вынос мелкозема, который способствует выходу вторичных ореолов на поверхность и растяжению их по склону. Здесь характерны ослабленные вытянутые вторичные литохимические и открытые биогеохимические ореолы. Особенно четко элементный состав оруденения отражается в торфах. Например, в мерзлых торфах мощностью 1,0—1,3 северного склона в пределах вольфрамового месторождения содержится (%): вольфрама — 0,015, серебра — 0,001, бериллия —

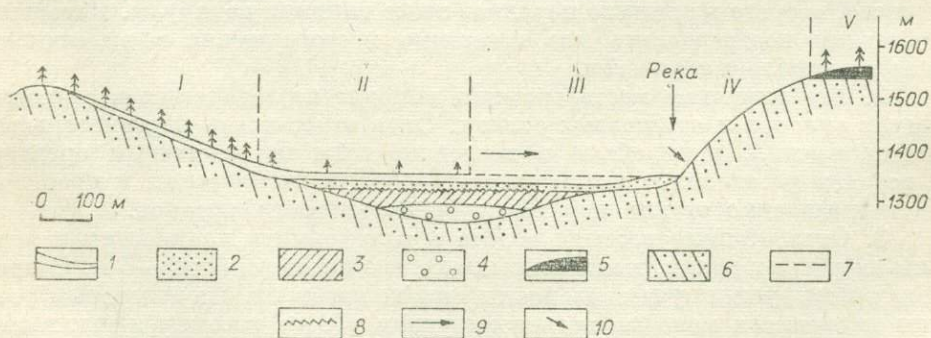


Рис. 2. Ландшафтно-геохимический профиль через долину р. Дархинтуя выше базальтовой подпруды.

1 — солифлюкционные глеевые отложения; 2 — плейстоценовый ожелезненный аллювий — галечники, пески; 3 — верхнеплиоценовые (?) подпрудные отложения — глеевые щебенистые глины, пески; 4 — верхнеплиоценовый аллювий — галечники; 5 — миоценовые базальты; 6 — песчаники и сланцы кембрия; 7 — кислородный геохимический барьер; 8 — глеевый геохимический барьер; 9 — направление перемещения русла р. Дархинтуя; 10 — подрезанный скальный участок в основании убура.

Элементарные ландшафты: I — моховая мерзлотная лиственничная тайга ($H^+ - Fe^{2+}$), II — моховой ерник ($H^+ - Fe^{2+}$), III — осоковый луг ($H^+ - Fe^{2+}$), IV — убур (Ca^{2+}) и V — лиственничная тайга (H^+).

0,005, висмута — 0,0005, лития и свинца — 0,008 и фтора — 0,3.

На исследованной площади характерны концентрации элементов на геохимических барьерах [Перельман, 1975]. Известны кислородные, биогеохимические, глеевые, щелочные барьеры.

Кислородные барьеры связаны с осаждением гидроокислов железа. Примером их являются зоны ожелезнения древних разрывов и современные железистые осадки на болотах вдоль водоносных разломов. Гидроокислы железа концентрируют рудные элементы, усиливают геохимические аномалии. Нами предложен прием поисков с опробованием гидроокислов железа погребенного оруденения на болотах и геохимической индикации разломов [Тайсаев, 1974].

Биогеохимические барьеры возникают в органогенных отложениях и растительности руслового потока, болот и озер. Перспективно использование этих барьеров при поисках на северных склонах и для биогеохимической индикации потоков рассеяния на участках ослабленных литохимических и водных потоков. Наши работы показали, что участки молибденового оруденения отражаются более контрастными и протяженными биогеохимическими потоками (по коре лиственницы), чем литохимическими. Так, длина биогеохимического потока молибдена (0,08—0,003%) Харасунского рудопроявления молибдена равна 6,2 км, а литохимического (0,01—0,0008%) — 1,2 км. При биогеохимических поисках в долинах пробы следует отбирать в пределах руслового потока по единичным профилям. Этот прием позволяет ограниченным количеством проб (5—7) изучить потоки водосборов и наметить пути разрежения плотности опробования.

Глеевые барьеры связаны с глеевой средой, которые возникают на болотах и озерах. Пример этого барьера — накопление редких элементов в верхнеплиоценовых озерных илах в устье Прамодонкуля.

Полученные представления по особенностям формирования геохимических ореолов были положены нами в основу крупномасштабного районирования Джидинского рудного района по условиям геохимических поисков (рис. 3). Такая работа сделана впервые для территории около 2500 км². Анализ результатов геохимических поисков и карт районирования бассейна р. Джиды позволяет сделать следующие выводы.

1. Геохимическая съемка по потокам рассеяния с плотностью опробования 5—7 проб на 1 км² показала высокую эффективность и достоверность в пределах расчлененных междуречий, дренируемых водотоками первого, второго и третьего порядков выше влияния подруды. Потоками рассеяния подтвердились все известные месторождения и выделились новые аномальные участки.

2. Все известные месторождения выходят на водоразделах, верхних частях склонов и останцевых сопках. Сюда относятся и редкометальные месторождения, выявленные в последние годы по вторичным ореолам и потокам рассеяния. Ореолы этих месторождений открытые и проявляются независимо от влияния подруды базальтовых потоков.

3. Отработанные россыпи золота и вольфрамита приурочены к верховьям речных долин, выполненных аллювием мощностью 3—6 м. В пределах подрудных участков долин они не известны. По некоторым речкам выделяются молодые послеподрудные убогие россыпи и шлиховые потоки этих металлов на продолжении промышленных россыпей. Залегают они на щебенистых глинах подрудных водоемов и на аллювии врезанных участков долин в базальтовых лавах. Весьма вероятны погребенные россыпи на расположенных ниже подрудных участках долины.

4. Не известны месторождения в нижних частях склонов подрудных долин, где проведены поиски по вторичным ореолам путем обортовки склонов. Здесь вторичные ореолы перекрыты склоновыми отложениями большой мощности. Молодые врезы ложков на склонах не вскрывают древние ореолы рассеяния.

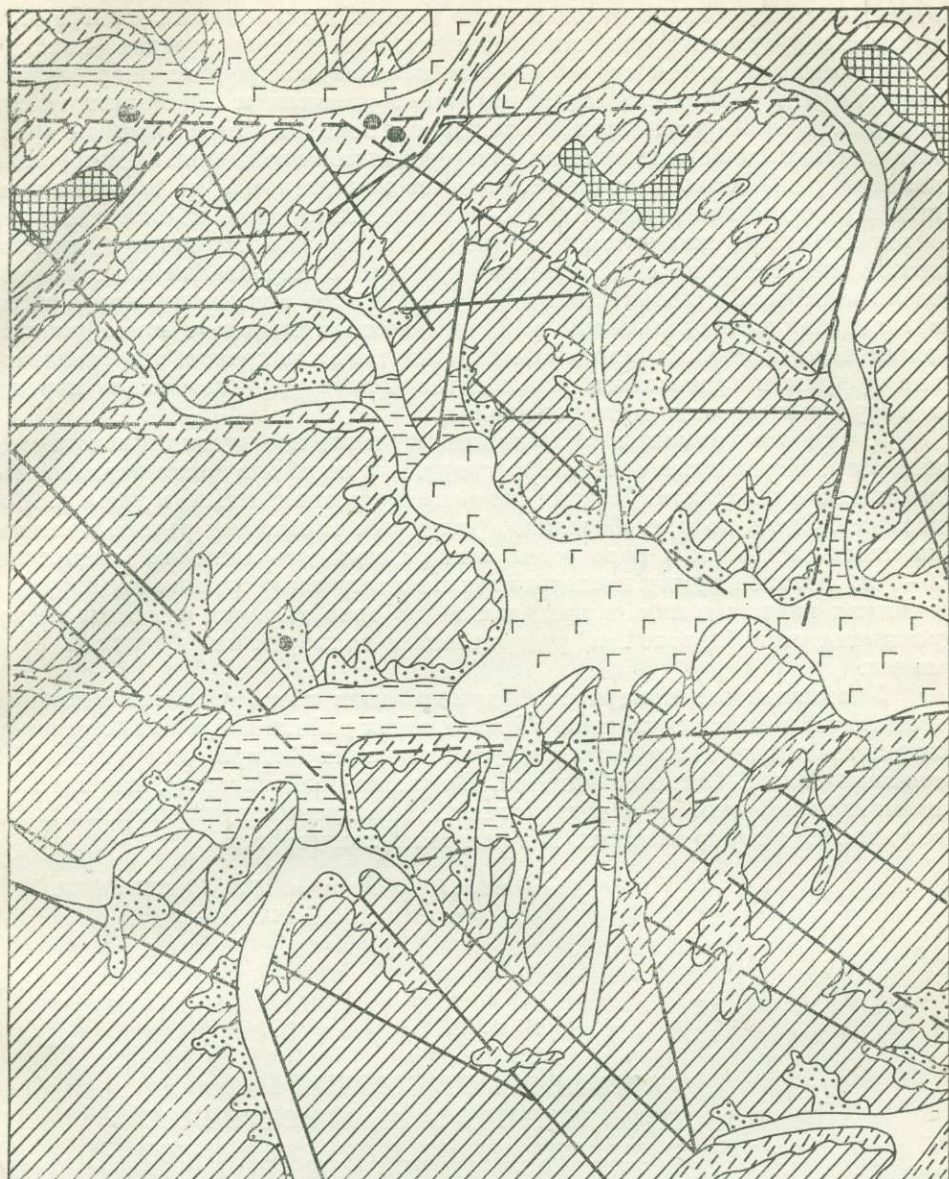


Рис. 3. Схема районирования Дзидзидского района по условиям геохимических поисков. Таежные ландшафты расчлененного среднегорья.

1 — междуречья с убурами (метод поисков по потокам и вторичным ореолам); 2 — склоновые отложения: а — пролювиально-делювиальные мощностью 5—10 м, б — сшлифованные шлейфы и солифлюкции, выполняющие верхья ключей, мощностью 3—20 м (биогеохимические и глубинные методы); 3 — подрудные заболоченные днища речных долин (глубинные методы); 4 — площади развития верхне- и среднеплейстоценовых озерных илов (глубинные методы); 5 — останцы обтекания среди склоновых отложений (металлометрические съемки); 6 — базальтовые потоки плиоцена и плейстоцена; 7 — водоразделы, бренированные покровами мисценевых базальтов; 8 — плоские водоразделы с верховыми болотами (био- и литогеохимические методы); 9 — разрывы, выраженные в рельефе.

5. Основной резерв для поисков рудных и россыпных месторождений представляют закрытые площади в пределах подрудных долин — нижние части склонов и днища долин, а также заболоченные древние поверхности выравнивания. Особые трудности для поисков существуют на северных склонах речных долин, нижние части которых перекрыты озер-

ными, аллювиальными отложениями и солифлюкционными шлейфами, а также на курумных склонах в гольцах. Реализация резерва поисков здесь возможна путем геохимических поисков по древним погребенным вторичным ореолам и потокам по линии скважин и биогеохимических поисков. В этой связи перспективен прием поисков с опробованием древних озерных илов с целью выявления рудных месторождений в подпрудных долинах рек. Вдоль таликовых участков зон разломов на выходах трещинных вод рекомендуются гидро- и биогеохимические поиски и поиски с опробованием железистых осадков. На курумных склонах поиски необходимо вести по суффозионным ореолам с опробованием мелкозема вдоль подножия склонов [Тайсаев, 1977₁]. Такие склоны широко развиты в гольцовой и подгольцовой зоне на участках молодого вреза речных долин водораздельных миоценовых базальтовых покровов, где базальтовые курумы в эрозионных окнах перекрывают рудовмещающие породы и вторичные ореолы месторождений.

6. Особого внимания заслуживает изучение палеогеохимии подпрудных озер. Необходима оценка на агроруды и лечебные грязи верхнеплиоценовых озерных илов, богатых редкими микроэлементами, в устье р. Модонкуля. Здесь по правобережью Джиды эти отложения распространены на площади 1,5 км и перекрыты плащом молодого аллювия мощностью 2—7 м. Рекомендуются исследования по этому вопросу и на подпрудных участках речных долин, в пределах водосборов которых известны месторождения молибденовой и редкометалльно-вольфрам-молибденовой формации.

Указанные закономерности формирования геохимических аномалий и опыт геохимических поисков в Джидинском районе могут быть с успехом использованы при поисках и в других регионах Сибири (Западный и Восточный Саяны, Становое нагорье, Витимское плоскогорье), где активно проявился неогеновый и четвертичный базальтовый вулканизм на месте современных горно-таежных и гольцовых ландшафтов.

*Геологический институт БФ СО АН СССР,
г. Улан-Удэ*

В. А. ГЛУХОВ

СОСТОЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ И ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ В СССР

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ

В результате сокращения фонда приповерхностных месторождений все более острой становится проблема подготовки резервной сырьевой базы за счет глубинных рудных объектов. Большое значение для решения этой задачи имеет применение геохимических методов поисков, являющихся сравнительно дешевыми, экспрессными и обладающими большой потенциальной глубиной. Роль их в развитии минерально-сырьевой базы страны отмечена XXV съездом КПСС.

В принятом съездом Постановлении «Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг.» предусмотрено «расширить применение прогрессивных геофизических и геохимических методов» [Материалы XXV съезда КПСС. М., Госполитиздат, 1976, с. 183].

На современном этапе прирост минерально-сырьевых ресурсов не может осуществляться за счет простого увеличения объемов геолого-

Основные показатели применения геохимических методов поисков

Метод	Начало применения (год)	Опознанный площадь (тыс. км ²)	Отобрано геохимических проб (тыс. шт)	Выявлено геохимических аномалий (ореолов)	Проверено аномалий (ореолов)	Открыто рудных объектов		
						месторождений	Рудных тел и зон	Рудопроявлений
Литохимические поиски по вторичным ореолам	1949	5100	105 000	65 000	7000	90	75	800
Литохимические поиски по потокам рассеяния	1956	500	10 000	3 000	100	2	0	30
Литохимические поиски по первичным ореолам	1960	—	3 000	3 200	500	5	50	80
Глубинные геохимические поиски	1962	0,2	Нет свед.	20	10	1	8	6
Гидрохимические поиски	1952	600	4 000	4 200	200	4	1	40
Биогеохимические поиски	1938	Нет свед.	50	1 000	50	0	0	3
Атмохимические поиски	1963	0,5	20	200	60	0	10	37

разведочных работ, весьма важно совершенствование методов поисков и разведки, внедрение в практику новых прогрессивных способов ведения работ. Как показала 40-летняя практика применения геохимических методов поисков, роль их в повышении эффективности поисково-разведочных работ постоянно возрастает, и значительная часть их потенциальных возможностей еще не использована.

В настоящее время применяются следующие геохимические методы поисков: 1) литохимические поиски по вторичным ореолам рассеяния поверхностного формирования («металлометрия»); 2) литохимические поиски по потокам рассеяния («донное опробование»); 3) глубинные литохимические поиски; 4) литохимические поиски по первичным ореолам; 5) гидрохимические поиски; 6) биогеохимические поиски; 7) атмохимические поиски. Данные по применению этих методов приведены в табл. 1.

Как видно, литохимические поиски по вторичным ореолам применяются давно и наиболее широко внедрены в практику работ. Они привели к открытию наибольшего по сравнению с другими геохимическими методами количества месторождений и рудопроявлений. Однако за последнее десятилетие наблюдается повсеместная тенденция ежегодного снижения объемов работ этим методом, что объясняется прежде всего недостаточной эффективностью их обычного варианта в связи со сложностью поисковых условий — разнообразием типов рыхлых образований, резкими колебаниями их мощности даже в пределах небольших участков, невыдержанностью генетических горизонтов почвенного профиля и т. д. При формализованном применении без учета ландшафтно-геохимических условий опоскование этим методом более чем на половине заснятых площадей (2,6 млн км²) по современной оценке признается малоэффективным, и на этих площадях требуется повторное проведение геохимических поисков или переинтерпретация данных геохимических съемок прошлых лет. Необходимо совершенствование метода и более локальное использование его, но лишь в тех условиях, где он может привести к успеху. Наиболее эффективен он на стадии средне- и крупномасштабных поисков (м-б 1 : 50 000—1 : 10 000) в открытых районах. Рационально его применение в указанных масштабах и в закрытых районах, если поисковую задачу можно решить по наложенным гипергенным ореолам рассеяния.

Сплошное покрытие площадей геохимическими съемками наилучшим образом достигается с помощью литохимического опробования по потокам рассеяния. Этот метод стал применяться позже, чем съемка по вторичным ореолам, и поэтому объем работ меньше. Наиболее широко он используется в Киргизии, Казахстане, Восточной Сибири, на Дальнем Востоке и в Армении.

К достоинствам метода потоков рассеяния относятся прежде всего повышенная глубинность и возможность быстрого опробования больших площадей. Повышенная глубинность обеспечивается переработкой водными потоками всего объема твердого материала, поступающего со склонов, и привнесом веществ подземными водами, а быстрота опробования — меньшей плотностью опробования.

По сравнению с площадной литохимической съемкой по вторичным ореолам съемка по потокам позволяет отбирать меньшее количество проб, а в отличие от шлихового метода она дает возможность проследживать потоки рассеяния с дисперсными формами рудного вещества и одновременно фиксировать механические и солевые потоки, в результате чего расширяется круг обнаруживаемых месторождений. Метод прост в исполнении, экономичен и удобен для использования при геохимическом картировании, в том числе и на таких площадях, где применение других поисковых методов, например съемки по ореолам, малоэффективно. Кроме того, он не требует предварительного проведения дорогостоящих вспомогательных работ, например топографических.

Съемка по потокам позволяет значительно сокращать площади более детальных поисковых работ. Так, в Куолайрвинском районе (Кольский п-в) из заснятой по потокам площади в 600 км² наиболее перспективной для последующего детального опробования рекомендована площадь 20 км², а в Печенгско-Аллареченском районе (Кольский полуостров) из 6500—350 км².

На Дальнем Востоке по потокам рассеяния обнаружены 1200 геохимических аномалий, по которым выявлены рудопроявления олова, молибдена и полиметаллов. На территории Армении с помощью этого метода выявлено и оконтурено большое число аномальных участков, медноколчеданного, медно-молибденового, барит-полиметаллического и других типов оруденения, значительные успехи при поисках по потокам сделаны и в других районах.

Применение литохимических поисков по потокам рассеяния наиболее целесообразно при мелко- и среднемасштабных (1 : 200 000—1 : 50 000) работах в комплексе с последующими детальными (1 : 25 000—1 : 10 000) поисками по вторичным ореолам.

На закрытых площадях с большой мощностью рыхлых отложений необходимо применять глубинные геохимические методы. Литохимические поиски по погребенным вторичным ореолам рассеяния с глубинным опробованием начаты в геологических организациях Казахстана и Восточной Сибири. В Центральном Казахстане первый положительный опыт применения этого метода был получен еще в 1962—1965 гг. На участке рудоносной структуры, погребенной под аллохтонным покровом мощностью от 5 до 20 м, было выявлено 7 погребенных геохимических аномалий. В Джезказганском меднорудном районе он эффективно применялся при поисках новых рудных залежей и для направления поисково-разведочного бурения на флангах месторождений. Особенно успешным было применение глубинных геохимических поисков в Мугоджарах, где с их помощью открыта крупная залежь медноколчеданного месторождения «50 лет Октября». Положительные результаты при работе этим методом получены и в Восточной Сибири.

Необходимым условием применения глубинных геохимических поисков является их техническое оснащение: малогабаритными транспортными высокопроизводительными буровыми станками, надежными

приспособлениями для глубинного пробоотбора из рыхлых пород, в том числе щебенистой массы коры выветривания (боковых грунтоносков, пробоотборников), легкопереносных ручных буров, фиксаторов глубины отбора проб и т. д. Без этих технических средств лишь с использованием обычных способов бурения и шурфов применение глубинных геохимических поисков на обширных закрытых территориях окажется недопустимо дорогим, затянется на многие десятилетия и все равно не даст требуемого поискового эффекта. По расчетам казахстанских геологов, затраты на применение этого метода в условиях Казахстана составят более 2/3 от всех будущих затрат на геохимические поиски при опосковании с его помощью лишь 1/9 части всех площадей, перекрытых чехлом рыхлых отложений мощностью от 100 до 200 м. Но, безусловно, целесообразно выборочное применение метода на локальных площадях, привлечении внимания по различным данным, в том числе опережающих геохимических съемках в поверхностных модификациях — атмосферических, литохимических по наложенным ореолам и т. п. [Овчинников, Григорян, 1977].

Большое значение приобрели поиски по первичным ореолам. За последние 15 лет изучение первичных ореолов произведено примерно на 280 рудных месторождениях, выбранных в качестве эталонных объектов для разрабовки поисковых критериев для оруденения различного типа. Изучение эндогенных ореолов производилось преимущественно на месторождениях цветных, редких и благородных металлов, на единичных объектах изучались ореолы месторождений черных металлов, а также бора и фосфоритов. Можно считать, что к настоящему времени более надежно выявлены поисковые критерии свинцово-цинковых, оловорудных, вольфрамовых, бериллиевых и некоторых типов золоторудных месторождений. В ИМГРЭ составлены методические пособия для поисков эндогенных месторождений этих металлов по их первичным ореолам. Наибольшим успехом применение этого метода ознаменовалось в Карамазаре, где были надежно установлены критерии выявления скрытого оруденения по первичным ореолам, способствовавшие открытию слепых рудных тел цветных и редких металлов (по данным С. В. Григоряна). Менее разработан метод поисков по первичным ореолам для других месторождений — медно-никелевых, ртутных и сурьмяно-ртутных, молибденовых, редкоземельных, комплексных редкометальных и др.

Гидрохимические поиски на территории страны проводились многими научными и производственными организациями на месторождениях различного типа, в разнообразных климатических, геоморфологических и геологических условиях. О значительной эффективности этого метода свидетельствует открытие с его помощью залежей медно-никелевых руд Октябрьского месторождения в районе Норильска, участков колчеданно-полиметаллического оруденения в Енисейском кряже, Гайского медно-колчеданного месторождения на Урале и т. д. Однако оценка гидрохимических аномалий более трудна, подавляющая часть их остается непроверенной, и в результате полезная для поисков информация, получаемая при гидрохимических исследованиях, слабо используется. Перспективы дальнейшего развития метода будут во многом определяться разработкой методики интерпретации гидрохимической информации.

Работы по биогеохимическим поискам имеют более чем 40-летнюю историю, но до настоящего времени они не нашли широкого практического применения, хотя выявлено несколько рудопроявлений и большое количество непроверенных аномалий. Причина этого в значительной мере — сложность интерпретации получаемых данных, оценки выявляемых аномалий и обнаружения по ним коренного оруденения. Однако необходимо учитывать глубинность биогеохимического метода. Полагают, что он позволяет выявлять месторождения и рудные тела над рыхлым покровом мощностью 10—30 м, а в аридных районах до 50 м и, возможно, более. Применение метода особенно целесообразно на площадях распространения

оловых отложений, а также в гумидных районах на болотах, марях и курумах, где применение других геохимических методов поисков ограничено или невозможно. Достоинством биогеохимических поисков является возможность круглогодичного их проведения.

Атмохимические методы, основанные на изучении химического состава грунтового и атмосферного воздуха и газов, растворенных в подземных водах, наибольшее применение нашли в качестве прямых методов поисков нефтегазовых месторождений. Для поисков рудных месторождений наиболее разработан метод газортутной съемки. Перспективны также методы определения углекислого, углеводородных, сернистых и некоторых других газов, могут быть использованы данные гелиевой съемки.

Газортутная съемка апробировалась на ртутных месторождениях Казахстана, Средней Азии и Украины. Установлено, что по газовым ореолам ртути фиксируются месторождения, залегающие на глубине до 200 м. Газортутный метод может быть применен и для выявления месторождений других металлов. Как показали исследования, проведенные в ИМГРЭ [Фурсов, 1976], над рудными телами медно-молибденовых, медно-колчеданных, вольфрамовых, золоторудных и полиметаллических месторождений при глубинах залегания их до 100—200 м обнаруживаются четкие ореолы паров ртути в почвенном воздухе с концентрацией элемента в 7—30 раз больше фоновой.

Широкое производственное внедрение этого перспективного метода пока зависит от массового выпуска малогабаритной и высокочувствительной газометрической аппаратуры (газоанализаторов типа ИМГРЭ-4).

ОЦЕНКА ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ РАБОТ

В свете решения XXV съезда КПСС о резком повышении качества и эффективности работ во всех отраслях народного хозяйства должны быть рассмотрены качество и эффективность геохимических методов поисков. Указанное решение глубоко затрагивает экономику геологоразведочных работ, еще мало разработанную отрасль экономической науки, имеющую много неразрешенных или дискуссионных проблем.

К числу их относятся теоретические и практические основы оценки экономической эффективности различных, в том числе геохимических, методов поисков и разведки месторождений на исследованных стадиях их применения. Выполнявшиеся до сих пор экономические исследования в геологоразведочном деле носили главным образом отраслевой характер. Они были направлены на разработку вопросов экономически главнейших видов минерального сырья и геологоразведочных работ в целом, но мало касались назревших проблем экономики различных методов геологоразведочного процесса, с помощью которых осуществляются поиски, оценка и прогнозирование минерального сырья. Исследования в области геолого-экономической оценки эффективности методов необходимы для их научно обоснованного планирования, направления и эффективного использования.

Для геохимических методов, характеризующихся малой стоимостью единицы и небольшими затратами в общей совокупности работ, понятие эффекта (физического выражения результата хозяйственной деятельности) не является важным, а понятие геолого-экономической эффективности, т. е. соотношения геолого-экономического эффекта и вызвавших его затрат, имеет первостепенное значение.

В своей сущности понятие эффективности геохимических поисков формируется на основе главного целевого назначения этих методов, заключающегося прежде всего в поисках и оконтуривании с поверхности

и на глубину участков, перспективных на обнаружение месторождений, составляющих их рудных тел (зон) и рудопроявлений. Эта эффективность должна характеризоваться системным рассмотрением всех их результатов: от фиксации геохимических аномалий до открытия по ним месторождений или отдельных рудных объектов в отношении к затратам — текущим и прошлым.

Геохимические поиски считаются эффективными, если получаемые при их проведении данные существенно дополняют имеющуюся информацию об изучаемом объекте (участке) и приближают геолога к решению общей задачи; позволяют выработать конкретные рекомендации по целенаправленному продолжению поисково-разведочных работ; дают возможность исключить из дальнейшего поискования бесперспективные площади.

Основными показателями геолого-экономической эффективности геохимических методов следует считать:

— количество обоснованно зафиксированных геохимических аномалий (ореолов), проверяемых при последующих поисково-разведочных работах;

— количество выявленных по рекомендованным для дальнейших работ геохимическим аномалиям (ореолам) месторождений, рудных тел (зон), рудопроявлений;

— количество и качество прогнозных, предварительно оцененных или разведанных запасов полезных ископаемых, выявленных на различных стадиях геологоразведочных работ по геохимическим рекомендациям;

— количество обоснованно исключенных по геохимическим данным бесперспективных площадей (участков), оцененных ранее как перспективные другими геологическими методами.

Кроме того, эффективность геохимических методов должна характеризоваться показателями, учитывающими долевое участие их в конечных результатах геологоразведочных работ и долю экономической эффективности, полученной по данным геохимических рекомендаций. Долевая эффективность должна определяться при обчете:

— количества и качества разведанных запасов полезных ископаемых, предназначенных для промышленного освоения;

— стоимости разведанных запасов полезных ископаемых в месторождениях, отдельных рудных телах (зонах);

— экономии затрат на поисково-разведочных работах, полученной от их корректировки по данным геохимических рекомендаций.

Нормативными показателями эффективности могут стать геохимическая проба, соотнесенная к зафиксированной по ней аномалии, и геохимическая аномалия, соотнесенная к открытому по ней рудному объекту. Можно предложить следующие показатели:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{n}{m}; \mathcal{E}_2 = \frac{m}{M}; \mathcal{E}_3 = \frac{m_1}{M}; \mathcal{E}_4 = \frac{m}{M_1}; \mathcal{E}_5 = \frac{m_1}{M_1},$$

где n — количество отобранных при работе данным методом геохимических проб; m — количество зафиксированных геохимических аномалий; m_1 — количество проверенных аномалий; M — количество открытых рудных объектов (месторождений, рудных тел, рудопроявлений); M_1 — количество открытых промышленных рудных объектов (месторождений, рудных тел).

Использование рекомендуемых коэффициентов дает при простоте расчетов первое объективное представление об эффективности геохимических поисков.

Проведенный автором анализ показал, что на обнаружение одной геохимической аномалии по различным геологическим управлениям расходуется от 210 до 22 000 проб, на открытие одного рудного объекта — от 33 000 до 350 000 проб, а на открытие одного промышленного месторож-

дения — от 250 000 до 3 500 000 проб. В среднем по Министерству геологии СССР эти показатели составляют соответственно 1 300, 76 000 и 525 000 проб.

Исходя из стоимости геохимической пробы, включая ее отбор, анализ и интерпретацию полученных данных, колеблющейся в пределах 2—5 руб, можно рассчитать затраты на обнаружение одной геохимической аномалии, рудного объекта и промышленного месторождения.

В расчете на зафиксированную геохимическую аномалию для открытия одного рудного объекта геологическим управлением требуется от 1 до 600 аномалий, а промышленного месторождения — от 40 до 2200 аномалий (средние показатели по стране соответственно 50 и 420 аномалий).

В расчете по проведенным геохимическим аномалиям на открытие одного рудного объекта приходится от 1 до 80 аномалий, в том числе на открытие промышленного месторождения — от 3 до 135 аномалий (средние показатели соответственно 4 и 3 аномалий). В Уральском ТГУ в среднем каждая 5-я геохимическая аномалия из числа проверенных способствовала открытию рудного объекта, а каждая 30-я приводила к открытию месторождения. По Оренбургскому ТГУ к открытию рудного объекта приводила каждая 6-я из проверенных геохимических аномалий, а к открытию месторождения — каждая 150-я. По Камчатскому ТГУ при 100%-ной проверяемости зафиксированных геохимических аномалий к открытию рудного объекта привела каждая проверенная аномалия, а к открытию месторождения — 185-я.

Располагая этими данными и зная количество зафиксированных, но не проверенных геохимических аномалий, можно в первом приближении определить резервные возможности открытия новых рудных объектов и месторождений при производстве работ по проверке аномалий.

Указанные показатели можно использовать для оценки эффективности геохимических поисков в разных районах и для сравнения различных методов по эффективности между собой. В табл. 2 представлены данные по Министерству геологии СССР в целом. Следует учитывать, что районные различия могут быть связаны с поисковыми условиями, перспективностью и степенью изученности, а эффективность методов зависит от того, что они применяются в разных условиях и с различными целями.

Вышеприведенные критерии характеризуют лишь чисто геологическую, поисковую результативность геохимических методов, но не отражают экономической сущности их эффективности. Очевидно, представляет интерес стоимостное выражение полученных результатов по отношению к общим затратам на проведение работ тем или иным методом и на каждый затраченный рубль в среднем. Для этого необходимо ввести дополнительные показатели.

Таблица 2

Эффективность различных геохимических методов

Метод	Период (год)	Отобрано проб	Выявлено аномалий	По ним открыто		Количество проб на открытие одной аномалии	Количество аномалий на открытие рудного объекта	Количество аномалий на открытие промышленного рудного объекта
				месторождений	рудных тел			
Литохимические поиски по вторичным ореолам рассеяния	1949—1973	105 000 000	65 000	90	75	1615	400	720
Литохимические поиски по первичным ореолам	1963—1973	3 000 000	3 200	5	50	980	60	640
Гидрохимические поиски	1952—1973	4 000 000	4 200	4	1	950	840	1050

Таким показателем является прежде всего стоимость разведанных в недрах запасов полезных ископаемых, ранее не учтенных и приращенных на основе рекомендаций по результатам геохимических работ. Эта стоимость рассчитывается по формуле [Кобахидзе, 1973]:

$$S_{p.з} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \Pi_{ij},$$

где $S_{p.з}$ — стоимость разведанных запасов полезных ископаемых; P — запасы отдельных месторождений или участков, разведанные по рекомендациям на основе данного геохимического метода (τ); Π — цена единицы запасов полезного ископаемого (руб.); n — количество рекомендованных месторождений и участков по данному виду полезного ископаемого; m — число полезных ископаемых.

Второй показатель определяется по формуле

$$K_a = \frac{S_{p.з}}{S_r},$$

где S_r — общие затраты на применение геохимического метода (руб.); K_a — показатель экономической эффективности, равный стоимости разведанных запасов на рубль этих затрат.

Указанные показатели могут быть применены для оценки экономической эффективности геохимических методов, если с их помощью открыты и в последующем детально разведаны новые месторождения или промышленные рудные объекты на известных месторождениях, но их нельзя применить, если работы в указанном смысле окончились безрезультатно и с помощью геохимических методов не было найдено конкретных рудных объектов.

В этом случае эффективными следует считать такие затраты на геохимические методы, с помощью которых локализованы площади или интервалы геологических разрезов, перспективные для применения других поисковых методов, а также определены бесперспективные площади и интервалы.

Для определения экономической эффективности геохимических работ, хотя и не ознаменовавшихся открытием рудных объектов, но локализовавших фронт последующих поисковых работ, необходимо использовать принцип альтернативности затрат, т. е. сопоставление затрат на геохимические методы с затратами, которые должны быть сделаны для получения аналогичного эффекта при применении стандартных поисковых методов. Наиболее объективной оценкой в данной ситуации может служить экономалия денежных средств, полученная в результате сокращения объемов последующих поисково-разведочных работ путем корректировки их по геохимическим рекомендациям. Исходный показатель для оценки эффективности геохимического метода можно определить по формуле

$$K_p = \frac{Q - Q_1}{Q},$$

где Q — общая площадь участков, опосредованных с помощью геохимического метода; Q_1 — площадь участков, признанных по геохимическим данным перспективными и рекомендованных для продолжения дальнейших работ.

Разбраковочный показатель K_p характеризует относительную величину исключенной из сферы дальнейших поисково-разведочных работ бесперспективной части площади.

Для расчета экономии денежных средств необходимо ввести дополнительные величины: V — общие объемы поисково-разведочных работ, которые могли быть затрачены на единицу площади (1 км²) или единицу разреза (1000 пог. м) без учета геохимических рекомендаций; V_1 — объем

поисково-разведочных работ, который необходимо затратить на единицу площади или разреза на их рекомендуемой по данным работ геохимическим методом перспективной части; S — сметная стоимость единицы объема поисково-разведочных работ; S_r — сметная стоимость работ по применению геохимического метода на всей опосредованной им площади.

На основе их показатели экономической эффективности геохимического метода определяются по формулам:

$$K_{\text{эп}} = \frac{QVS - Q_1V_1S}{QVS} \cdot 100 \% \quad \text{и} \quad K_{\text{эп}} = \frac{QVS - Q_1V_1S}{S_r},$$

$K_{\text{эп}}$ характеризует относительную экономию денежных средств, полученную от сокращения физических объемов поисково-разведочных работ в соответствии с геохимическими рекомендациями, а $K_{\text{эп}}$ — прибыль, полученную от внедрения геохимических рекомендаций в расчете на каждый рубль средств, затраченных на геохимическое опосредование площади.

Абсолютную экономию денежных средств дает формула $\Delta = QVS - Q_1V_1S$. В то же время эта сумма означает абсолютную прибыль от использования геохимических рекомендаций.

РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ

Повышение эффективности геохимических методов зависит от степени завершенности поискового цикла и совершенствования техники и технологии геохимических исследований, а также от подготовки квалифицированных кадров и разрешения вопросов, связанных с организацией, планированием, финансированием, учетом и стимулированием геохимических работ. Не останавливаясь на двух последних факторах, значение которых очевидно, мы охарактеризуем два первых.

В большей части геологических организаций эффективность геохимических поисков меньше, чем она могла бы быть исходя из их объемных показателей. Одна из главных причин этого заключается в незавершенности поискового цикла — в том, что геохимические работы, как правило, прекращаются на стадии фиксации аномалий без последующей их оценки, детализации и проверки.

По проведенным нами подсчетам из имевшихся 80 тысяч геохимических аномалий проверены только 10 тысяч, при этом открыто 1240 рудных объектов, в том числе 110 промышленных месторождений, 150 промышленных рудных тел и свыше 1000 перспективных рудопроявлений. Согласно указанным цифрам величины коэффициентов проверяемости аномалий, открытия по ним рудных объектов, а из числа последних — промышленных месторождений все равны примерно 0,1. Смысл этих данных заключается в том, что они характеризуют огромный неиспользованный резерв значительного повышения эффективности геохимических методов. Данные по регионам представлены в табл. 3. В некоторых территориальных управлениях количество непроверенных перспективных аномалий невелико, но в других оно значительно и допускает расширение работ по проверке аномалий.

По данным Приморского и Читинского ТГУ, затраты на оценку одной геохимической аномалии или группы сближенных аномалий с определением их формационной принадлежности, но без прогнозирования на глубину в среднем не превышают 15 тыс. руб. При дополнительных работах на перспективных аномалиях и рудопроявлениях, выявленных на первой стадии оценочных работ, с обращением перспектив оруденения на глубину и вскрытием рудных тел и зон горно-буровыми выработками с плотностью, соответствующей м-бу 1 : 25 000—1 : 10 000, затраты возрастают до

Таблица 3

Показатели проверяемости геохимических аномалий и открытия рудных объектов

ТГУ	Количество зафиксированных аномалий	Количество проверенных аномалий	Коэффициент проверяемости (КП)	Количество открытых рудных объектов	Коэффициент открытия (КО)	Открытые рудные объекты		
						местоположения	рудные тела (зоны)	руднопоявления
Оренбургское	1 710	405	0,24	101	0,25	5	4	92
Бурятское	15 000	1360	0,09	320	0,24	20	0	300
1955—1966 гг.		60	—	12	0,20	2	0	10
1966—1970 гг.	500	400	0,8	108	0,27	8	0	100
1970—1975 гг.		900	—	200	0,22	10	0	190
Красноярское	3 000	400	0,13	22	0,06	13	6	3
Енисейский край	1 126	140	0,12	10	0,07	10	—	—
Читинское	700	380	0,54	135	0,36	12	10	113
Приморское	3 730	763	0,20	317	0,4	6	1	310
Якутское	4 800	600	0,12	46	0,08	3	0	43
1975 г.	100	100	1,0	30	0,30	0	0	30
Иркутское	17 000	2352	0,14	54	0,02	5	18	31
1971—1975 гг.	300	56	0,19	25	0,45	1	0	24
Камчатское (1953—1976 гг.)	295	295	1,0	236	0,80	1	50	185
Министерство геологии Украинской ССР (1970— 1976 гг.)	7 619	423	0,06	74	0,17	2	0	72

60 тыс. руб. После первой стадии оценочных работ отбраковывается, как правило, до 90% неперспективных аномалий. В целом расходы на такую двухстадийную оценку при большом числе непроверенных аномалий довольно велики, но они с лихвой окупаются выявлением месторождений, которое при этом происходит.

По расчетам геохимиков Красноярского ТГУ, затраты на открытие одного месторождения по геохимическим аномалиям на территории Красноярского края в среднем составляют около 300—500 тыс. руб. Это значительно меньше затрат на поисковые работы без применения геохимических методов.

В технике исполнения наиболее важной является зависимость эффективности геохимических поисков от точности и чувствительности определения содержания химических элементов в пробах и от полноты, скорости и своевременности обработки и интерпретации геохимической информации.

В настоящее время при производстве геохимических работ ежегодно анализируется около 4—5 млн. проб с определением в каждой из них от 15—20 до 30—40 химических элементов. Анализ этих проб ориентируется в основном на дифракционные спектрографы (ДФС-8, ДФС-13). Они обеспечивают необходимую чувствительность определения для большого числа элементов, чем ранее применявшиеся призменные спектрографы ИСП-22, ИСП-28, ИСП-30 и др. Вместе с тем чувствительность определения целого ряда элементов (As, Se, Sc, In, Cd, Sb, Te, Yb, Hf, Ta, W, Pt, Bi, Th, Re, U, Gd и др.) не удовлетворяет требованиям геохимических поисков, и необходимо применение приборов и методов, обеспечивающих ее повышение. Недостаточная чувствительность не дает возможности определять в пробах ряд элементов — прямых индикаторов оруденения. Кроме того, она обедняет ряд зональности элементов и ограничивает его практическое использование [Григорян, 1974].

В проблеме обработки геохимических данных большое значение имеет ее автоматизация и применение ЭВМ. Сейчас обработка их производится в значительной степени еще вручную, и при этом из 15—20 и более элементов, фиксируемых в пробах при обобщении, используются лишь 3—7,

что может приводить к снижению эффективности геохимических поисков, пропуску месторождений.

Третьим вопросом, связанным с техническим совершенствованием геохимических методов поисков, является механизированный отбор проб и расширение возможностей глубинного пробоотбора.

При литохимических поисках по вторичным ореолам рассеяния с опробованием вблизи дневной поверхности (на глубине до 20—30 см) отбор проб не вызывает затруднения. Но на обширных территориях, особенно в восточной части страны, где распространены таежные ландшафты, при геохимических поисках требуется опробование рыхлых образований до глубины 1—3 м и более, для чего необходимы легкие переносные высокопроизводительные станки типа механического бура геолога. Необходимость массового литохимического опробования нижних горизонтов рыхлых образований вызвана особенностями формирования геохимических ореолов в горно-таежных ландшафтах Урала и Сибири, занимающих площадь до 2 млн. км².

Определенные представления о вторичных ореолах рассеяния и процессах их образования [Поликарпочкин, 1976], а также анализ данных геохимических съемок привели к тому, что многие геохимики, работающие в восточных районах страны, считают, что в условиях указанных ландшафтов рудные месторождения, особенно имеющие в плане небольшие размеры (0,5—2 км²), как правило, не проявляются на поверхности рыхлых склоновых образований при мощности их больше 3 м и лишь в виде разрозненных аномальных точек фиксируются при меньшей мощности рыхлого покрова. На основании геохимических съемок такие площади обычно относятся к категории бесперспективных, хотя разрозненные аномальные точки могут оказаться поверхностными проявлениями закрытых геохимических ореолов рудных тел (такова ситуация в средних и нижних частях склонов).

При отборе проб с глубины 20—30 см в горно-таежных ландшафтах возможны многочисленные пропуски дефлюкционных ореолов рассеяния. Анализ материалов показывает, что в Забайкалье от 75 до 90% всех месторождений и рудопроявлений, обнаруженных на основе поверхностных литохимических съемок, расположено на водоразделах или в верхних частях склонов, а рудные объекты, находящиеся в средних и нижних частях склонов, поверхностными ореолами не фиксируются.

Характерен следующий случай в Бурятском геологическом управлении. На участке Хортяк первоначально поверхностной литохимической съемкой м-ба 1 : 50 000 был выявлен лишь слабоконтрастный вторичный ореол олова площадью около 8 км², в котором высокие аномальные содержания отмечены лишь в отдельных пробах. В связи с этим участок отнесен к категории неперспективных. Положительные результаты достигнуты путем послынного опробования склоновых образований на полную их мощность в шурфах, пройденных по сети 200 × 40, приведшего к фиксации на глубине до 3 м вытянутых по склону сплошных ореолов с закрытыми эпицентрами. Проверка их привела к выявлению рудного тела в несколько сот метров со средним и высоким содержанием олова и гнездовым его распределением.

Но применение шурфов на больших площадях для взятия проб на глубине при проведении литохимических съемок невозможно по экономическим причинам. Например, при опробовании по сетке, соответствующей м-бу 1 : 50 000 (500 × 50 м), и глубине шурфов 3 м на 1 млн. км² необходимо 120 млн. пог. м шурфов. Исходя из данных, приведенных в работе Н. И. Корнилова (1973), можно подсчитать, что при достигнутых по Министерству геологии СССР темпах проходки шурфов на это потребуется 60 лет работы и 20-летние затраты ассигнований на все горноразведочные работы (стоимость проходки: 1 пог. м шурфа — 20 руб.). Конечно, эти цифры совершенно не реалистичны.

Для того чтобы литохимическая съемка в горно-таежных ландшафтах с увеличенной глубиной пробоотбора (от 0,4 до 3 м и более) стала рентабельной, необходимо создание бурового станка, обеспечивающего стоимость проходки не более 1 руб./пог. м. Это близко к уже достигнутым цифрам. Так, стоимость проходки 1 пог. м шурфо-скважины станком УШБ-16 составляет 1,77 руб.

Обширную площадь (около 3 млн. км²) занимают в СССР области, в которых рудовмещающие породы перекрыты чехлом аллохтонных образований мощностью до 100—200 м и более. Применение для глубинных геохимических поисков существующих способов бурения со стоимостью 20 руб./пог. м и более здесь также нерентабельно, за исключением небольших по площади участков, перспективность которых определена различными методами. Проблема поисков на таких площадях с отбором проб рыхлых пород из перекрывающих отложений и погребенных кор выветривания становится разрешимой при создании высокопроизводительных буровых агрегатов для поискового геохимического опробования со стоимостью проходки 1—2 руб./пог. м. Важно также выявление перспективных участков на таких площадях путем применения атмосферических методов, литохимических поисков по наложенным ореолам и других глубинных методов.

Одним из важнейших факторов повышения геолого-экономической эффективности поисковых и разведочных работ является обеспечение своевременного и качественного геохимического опробования керна колонковых скважин, ежегодная проходка которых достигла в настоящее время 19 млн. пог. м и в дальнейшем будет возрастать примерно на 1 млн. пог. м в год. За 15 лет, с 1976 по 1990 г., из этих скважин должно быть отобрано 25—30 млн. геохимических проб, при ежегодных затратах 8—10 млн. руб. на их отбор, анализ и интерпретацию данных опробования. Получаемая в результате ценная информация при очень небольшой, по сравнению с общими затратами на бурение, стоимости ее позволит повысить глубинность геохимических поисков на 200—300 м и более, получать в комплексе с наземными геохимическими поисками объемную (трехмерную) геохимическую характеристику изучаемых объектов, давать более обоснованную оценку перспективам оруденения в закрытых районах, совершенствовать методику геохимических поисков и наиболее рациональное их комплексирование.

Для оперативного использования данных геохимического опробования важно своевременное его проведение. Учитывая, что в будущем будут совершенствоваться методы математической обработки данных и анализа вещественного состава проб, необходимо обеспечить сохранность первичной геохимической информации и хранение дубликатов геохимических проб без ограничения срока.

В заключение подчеркнем, что технический прогресс в развитии геохимических методов поисков, направленный на совершенствование аналитической аппаратуры, применение электронно-вычислительных машин и механизацию операций по глубинному пробоотбору, является одной из распространенных задач, от решения которых в значительной степени зависит повышение геологической и экономической эффективности геохимических методов и их долевого вклад в общую эффективность геологоразведочных работ.

ПРОБЛЕМА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ В ЗАПАДНОМ ЗАБАЙКАЛЬЕ

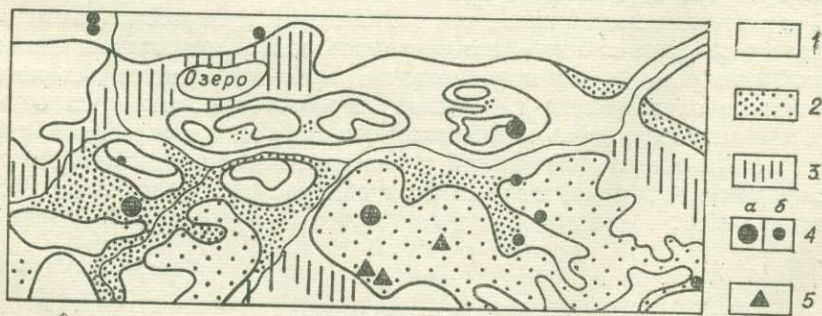
Западное Забайкалье относится к числу районов, в которых геохимические поиски в широких производственных масштабах стали проводиться с 1955—1958 гг. Почти весь объем поисковых геохимических работ на этой территории был выполнен Бурятским геологическим управлением, организованным в 1957 г. К настоящему времени геохимическая изученность Бурятии примерно такая же, как соседних областей: средне-масштабные геохимические поиски выполнены, за исключением мезокайнозойских впадин, на всей территории Бурятии, а крупномасштабные — на 40%.

В качестве примера успешного применения геохимических поисков приведем один из районов Бурятии площадью около 10 тыс. км² (см. рисунок). В этом районе в последние 15 лет в результате литохимической съемки по вторичным ореолам рассеяния обнаружено 10 рудопроявлений молибдена; на двух из них в обстановке широкого развития золотых и эолово-делювиальных отложений выявлению молибденового оруденения способствовало применение биогеохимической съемки. В результате оценочных работ на рудопроявлениях три из них переведены в разряд месторождений. Все они не были зафиксированы при геологической съемке ни визуально, ни шпиховым опробованием.

В целом с помощью геохимических поисков на территории Бурятии выявлено около тридцати месторождений и более 100 рудопроявлений различных металлов. Для выявления и оценки месторождений используются многие химические элементы, определяемые спектральным анализом.

Все это свидетельствует об успешном применении геохимических методов поисков, основа которых была заложена работами Н. И. Сафронова (1936). Выдвинутые им идеи об ореолах рассеяния и использование их при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых широко применяются на практике. В настоящее время поисковые работы, в какой бы части Бурятии они ни проводились, не мыслятся без выявления и изучения ореолов рассеяния.

Одними из первых бурятские геологи и геохимики применили разработанный Н. И. Сафроновым [Сафронов и др., 1957] метод спектрозолото-



Молибденовые месторождения, выявленные геохимическими методами поисков.

1 — районы, в которых отсутствуют эолово-делювиальные отложения; 2 — районы с покровом эолово-делювиальных отложений (густота крапа означает их мощность); 3 — мезокайнозойские впадины; 4 — выявленные геохимическими методами поисков молибденовые месторождения (а), рудопроявления (б); 5 — молибденовые рудопроявления, выявленные визуально или при участии геохимических методов поисков.

метрической съемки [Григорьев, 1959]. В настоящее время успешно внедряются разработанные на основе представлений Н. И. Сафронова (1972) новые физико-химические способы поисков, разведки и скважинной геохимии — ЧИМ, КСПК и МПФ.

Кроме работ Н. И. Сафронова, для успешного применения геохимических методов поисков на территории Бурятии имели значение исследования В. И. Красникова, Л. В. Таусона, Л. Н. Овчинникова, В. В. Поликарпочкина, А. И. Перельмана, А. П. Соловова, С. В. Григоряна, В. З. Фурсова, Ю. В. Шаркова. Большую практическую пользу принесли рабочие контакты БТГУ с большинством этих исследователей, а также координирующая деятельность Межведомственного совета по проблеме «Научные основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых» и его Сибирской секции. Значительную роль в повышении эффективности геохимических работ сыграли представления об особенностях геохимии ландшафтов Бурятии, о широком развитии здесь ореолов дефлюкционного типа и изучение условий поисков в обстановке характерного для южной части республики широкого распространения золотых отложений.

За 20-летний период геохимические поиски в Бурятии превратились в ведущий способ выявления рудных полезных ископаемых и оценки рудного потенциала площадей. Однако по мере роста геохимической изученности выдвигаются все более сложные задачи, требующие применения новых методов и принципов ведения работ. Наибольшее значение для дальнейшего совершенствования поисковой геохимии имеют следующие вопросы: а) повышение эффективности работ на основе применения современных математических методов оперативной обработки и обобщения данных геохимических съемок; б) выявление рудного резерва в закрытых и полужакрытых районах; в) стандартизация технологии и документации всех видов опробования; г) организация геохимических поисков; д) подготовка кадров.

Обобщение результатов геохимических методов поисков с использованием средств современной вычислительной математики и ЭВМ является той основой, которая совершенно необходима для дальнейшего применения этих методов. Трудно продвигаться вперед в геохимической оценке площадей, не зная результатов ранее проведенных работ.

В настоящее время методика обобщения геохимических данных недостаточно разработана, в разных местах она осуществляется по различным принципам и программам. Как правило, применяемые методы обработки и обобщения не дают возможности для глубокого анализа результатов геохимических работ.

Следует иметь в виду, что объем накопленной геохимической информации внушителен. В архивах в виде лабораторных бланков только в нашем управлении хранятся анализы миллионов различных проб. Кроме того, ежегодно анализируется 400—500 тыс. новых проб. Всегда существовала потребность оперативного всестороннего изучения этих анализов, но раньше такая задача была непосильной. До сих пор этот материал в полном объеме, по существу, никем не ревизовался, так как обобщение проводится, как правило, на основе только тех материалов, которые имеются в производственных отчетах. Одна из проблем состоит в выборе программ обобщения геохимической информации. В настоящее время в связи с обеспеченностью геологических управлений собственными ВЦ появилась возможность машинной обработки накопленных данных анализа геохимических проб.

В Бурятском территориальном геологическом управлении освоена разработанная Институтом геохимии им. академика А. П. Виноградова СО АН СССР и Иркутским университетом программа многомерных полей, основанная на представлении о геохимических ассоциациях, с распечаткой моно- и полиэлементных карт, что, помимо ускорения обработки ана-

лизом, намного повышает информативность результатов геохимических работ. Целый ряд вопросов нуждается еще в разработке. К ним относится создание автоматических приспособлений для снятия координат проб и машиноносителей для надежного долговременного хранения и многократного использования исходных данных. Отсутствует система стандартов по вводимости геохимических данных в ЭВМ. Введение машинной обработки требует разработки новой технической политики, рассчитанной на переориентацию геологов-производственников, которыми должны быть освоены принципиально новые виды отчетных геохимических документов. Мы сталкиваемся здесь с комплексом еще не решенных задач, связанных с внедрением автоматизированных систем обработки геохимических данных в производство.

Перед обобщением результатов геохимических поисков всегда ставится задача оценки надежности и других показателей качества ранее проведенных геохимических работ. Ту или иную часть геохимических съемок легко можно признать устаревшей, например, из-за низкой чувствительности анализа, малой плотности опробования и т. п. Но обычно ситуация сложна, так как необходимо на большом числе площадей разобрататься в качестве геохимических съемок, проведенных в разное время и в различных условиях, выяснить, почему быстро стареют геохимические карты. Определение степени надежности геохимической изученности площадей и управление качеством геохимических работ — непростая задача. Для облегчения ее необходимо исследование достаточно строгих критериев оценки качества и кондиционности геохимических работ различного масштаба. В БТГУ разработано несколько таких критериев применительно к местным материалам. Остановимся на двух из них, наиболее часто используемых — числе анализируемых элементов и представительности избранных методов поисков.

Требования к обязательному числу определяемых элементов при геохимических съемках м-ба 1 : 50 000 формулируется нами так: выбранный перечень элементов должен обеспечивать комплексное изучение площадей, быть доступным для определения в одном аналитическом приеме, т. е. по одной спектрограмме без применения специальных аналитических методов, при этом должна быть обеспечена возможность изучения зональности и распознавания аномалий, соответствующих различным по составу месторождениям. В этот список включено 26 одновременно определяемых элементов (в скобках указан предел обнаружения в $n \cdot 10^{-3}\%$): Ti(1); Mn(1); Ni(3); Zr(0,3); Cu(0,3); Cr(1); Ba(10); V(1); Mo(0,1); Be(0,1); Pb(1); Zn(3); Y(1); Co(0,8); P(30); Sn(0,1); Li(3); Nb(2); Ce(30); La(3); W(2), As(10); Bi(0,3); Sb(8); Ag(0,01); Sr(80).

Они являются индикаторными почти для всех известных в Бурятии типов месторождений. Указанный перечень элементов утвержден в БТГУ в виде стандарта предприятия, т. е. обязателен для всех партий, проводящих крупномасштабную геохимическую съемку. Одинаковый список анализируемых элементов на площади всех планшетов дает возможность при машинной обработке изображать непрерывные многокомпонентные геохимические поля, проводить комплексный металлогенический анализ на больших территориях и в конечном итоге способствует повышению качества геохимических съемок.

Не отмеченные в приводимом перечне элементы, например такие как Au, Hg, F, В, Rb, Cs, определяются лишь в части проб (по специальным методикам). Выбор этих проб осуществляется с учетом результатов анализа по предыдущему стандарту предприятия.

Критерий оценки представительности определенного метода в той или иной природной обстановке реализуется с помощью карт условий геохимических поисков. Он формулируется следующим образом: метод представителен в том случае, если его применение в данных условиях исключает пропуск месторождений, т. е. совпадают глубинность использован-

ного метода и уровень, на котором надежно проявлены ореолы. В БТГУ разрабатываются методические руководства по составлению карт, отображающих условия ведения геохимических поисков в среднем, крупном и детальном масштабах.

При достигнутой степени геохимической изученности обнаружение новых месторождений на территории Западного Забайкалья в дальнейшем будет происходить главным образом за счет выявления рудного резерва в полузакрытых и закрытых районах. Квалифицированное и качественное ведение поисковых работ в этих районах требует районирования условий геохимических поисков изучаемых площадей, установления соответствия разрешающей возможности метода конкретной природной обстановке, использования новых методов, умения интерпретировать и разбраковывать слабые геохимические аномалии. Практика показывает, что если поисковые работы отвечают этим требованиям, то даже в казалось бы давно изученных районах выявляются новые рудопроявления и месторождения. Но почти все они расположены в той части изученных районов, которая перекрыта чехлом дефлюкционных и эоловых отложений или заболочена. Это дает право считать, что изученность и рудный резерв надо оценивать в соответствии с границами выделенных типов районов — открытых, полузакрытых и закрытых.

По отношению к открытым районам справедлив тезис о том, что фонд легкооткрываемых рудных месторождений в них исчерпан. За последние годы в этих районах ни визуальные поиски, ни шпиховая съемка не дают положительных результатов. Мало остается здесь также площадей, где можно ожидать эффекта от обычной металлометрической съемки, поскольку ее плотность уже достаточно большая. Все четкие и наиболее контрастные аномалии, расположенные на хорошо доступных площадях открытых категорий, переведены в разряд изученных. Общее количество подобных аномалий невелико, а условия, в которых они находятся, не представляют трудностей для получения необходимого количества магистральных пересечений механизированными способами. Вместе с тем нужно иметь в виду, что в открытых районах могут быть пропущены сильно выщелоченные площади с поверхности зоны сульфидного оруденения. Кроме того, здесь должна быть поставлена задача обнаружения месторождений, залегающих на глубине и выходящих на поверхность лишь своими первичными ореолами.

К полузакрытым районам мы относим такие, в которых широко развиты различного характера молодые, в основном позднечетвертичные склоновые отложения мощностью от 1,5 до 7 м, с подчиненной ролью аллохтонных отложений. Общая площадь их не меньше, чем открытых районов. Отличительная их особенность — чередование открытых, полузакрытых и закрытых ореолов. Поэтому фонд имеющихся здесь месторождений в значительной степени еще не выявлен. В охарактеризованных условиях в начале поискового процесса трудно оценить с нужной детальностью геологическую обстановку и использовать весь обычный комплекс поисковых признаков, поэтому геологические маршруты оказываются малоинформативными и зачастую не позволяют выделить перспективные участки. Рудопроявления обнаруживаются здесь с помощью геохимических и геофизических методов поисков, и на первых порах геохимическая аномалия обычно является единственным признаком оруденения.

Сложность поисковых геохимических работ в полузакрытых и закрытых районах усугубляется тем, что в них еще недостаточно апробированы глубинные методы поисков, не выработаны принципы классификации этих районов, слабо разработаны методы их комплексной оценки, а также способы разбраковки аномалий. В условиях чередования открытых, полузакрытых и закрытых вторичных ореолов нельзя ожидать исчерпывающей оценки площадей при применении обычной литохимической съемки в поверхностном варианте, хотя ее проведение и дает некоторый отправной материал в начале поисковых работ.

Классификация характеризуемых районов — основа правильного районирования условий геохимических поисков и обоснования методики поисковых работ. Исследования в этом направлении ведутся, но ими пока охвачена только часть Западного Забайкалья. Сейчас выделяется несколько типов полузакрытых районов. В разных типах изучаются степень проявленности и способы надежного обнаружения геохимических аномалий различного оруденения, фиксируется интенсивность окисления и выщелачиваемость сульфидных месторождений. Наличие хорошо выраженных зон окисления и выщелачивания на многих молибденовых и колчеданно-полиметаллических месторождениях и широко развитых линейных кор выветривания слюдисто-глинистого состава с интенсивным ожелезнением говорит о гораздо большей распространенности, чем ожидалось, реликтовых продуктов доплейстоценовых процессов выветривания. Геохимическая изученность этих образований остается слабой, а методика документации недостаточно разработанной. Нужна геохимическая типизация зон окисления и выщелачивания, а также линейных кор выветривания, так как без этого невозможно разбраковывать собственные им слабоконтрастные вторичные ореолы. Для решения этих вопросов необходимо также знать, в какой степени вторичные ореолы унаследуют состав руд и первичных ореолов, если выходящее на эрозионную поверхность рудное тело претерпело сильное выщелачивание и перекрыто рыхлым чехлом. Зоны выщелачивания сульфидных месторождений и линейные коры выветривания — это только один пример таких объектов, вторичные ореолы которых в полузакрытых районах распознаются еще плохо. Уменьшению числа ошибок при разбраковке ослабленных и слабоконтрастных вторичных ореолов и потоков может помочь накопление большого справочного материала по характеристике вторичных ореолов различных типов рудных месторождений Сибири. Для этого рационально организовать с участием геохимиков различных геологических управлений централизованный сбор на ЭВМ банка соответствующих данных.

Все большее число полузакрытых и закрытых районов вовлекается в геохимическое изучение с помощью картировочного колонкового бурения. Наиболее сложный вопрос глубинных геохимических поисков в этом варианте — обоснование оптимальных сеток скважин и количества проб, достаточных для оценки того или иного района.

Стандартизация технологии и документации всех видов опробования и создание отраслевых и внутрипроизводственных (местных) геохимических стандартов является важнейшим средством управления качеством геохимических поисков. Эта проблема требует совместных усилий научно-исследовательских и производственных организаций. Важность ее определяется тем, что в значительной степени от решения данной проблемы зависит повышение качества производственных геохимических работ. Вопрос о контроле качества затрагивается в методической литературе и инструкциях, но рассматривается он неполно, отсутствуют четкие определения качества различных методов. Контроль за качеством геохимических работ осуществляется пока большей частью на основе субъективных и подчас неясных оценок. Правильность и представительность той или иной операции отбора и обработки проб, достаточность того или иного объема проб, содержание документации контролируются в разных местах по-разному, потому что ничем, кроме традиций, не определены. Научно обоснованные критерии качества отсутствуют по многим позициям полевой и камеральной части геохимических работ.

Для решения этой проблемы в настоящее время существует ряд благоприятных моментов — в территориальных геологических управлениях организуется служба метрологии и стандартизации по всем видам геологоразведочных работ; появился опыт создания стандартов предприятий (СТП) и ОСТов в смежных с поисковой геохимией видах работ.

Достаточно полное решение охарактеризованной проблемы на научной основе требует времени, поэтому следует использовать создание внутрипроизводственных (местных) геохимических стандартов (СТП). Такие стандарты описывают принятые в данном геологическом управлении требования к качеству избранного объекта, а также указывают, как самостоятельно проверить (оценить) это качество. На основе СТП должна вестись приемка полевых и камеральных материалов. В Бурятском геологическом управлении разрабатывается ряд СТП. Они предусматривают стандарты, определяющие, во-первых, качество всех применяемых видов опробования и, во-вторых, порядок оформления результатов анализов и всех других данных, вводимых в ЭВМ, с целью составления моно- и полиэлементных геохимических карт. Надо сказать, что машинная обработка геохимической информации сделала создание геохимических стандартов особенно актуальным. Необходимость ее можно проиллюстрировать следующим примером. При массовой централизованной обработке данных геохимических съемок появились свои из-за отсутствия в разных партиях единообразия характеристики условий отбора, записи анализов и геологического описания проб. Тем самым четко обозначились первоочередные объекты стандартизации. Другой пример: любое обобщение геохимических материалов, например составление сводной карты изученности, карты аномалий или металлогенической схемы, не приводят к созданию целостной картины для относительно большой территории. Образуются пробелы из-за отсутствия стандартов, определяющих оптимальную полноту сбора и кондиционность тех или иных исходных сведений.

Приведенные примеры показывают только малую часть объектов стандартизации на производстве. Создание внутрипроизводственных стандартов — наиболее целесообразный и действенный сейчас путь повышения качества не только потому, что разработать СТП можно относительно быстро. Внутрипроизводственная геохимическая стандартизация одновременно выявляет объекты, наиболее важная часть которых позже может быть переведена в разряд отраслевых геохимических стандартов. Для того чтобы при разработке СТП необходимый уровень качества задавался правильно, требуется научно обоснованное определение этого уровня применительно к различным методам и видам геохимических работ. Именно в этом вопросе испытывается острая потребность в содействии научно-исследовательских организаций. Нужна также систематика объектов стандартизации в геохимических методах поисков, разработка задач и методов метрологической службы, принципов экспертизы проектов и отчетов по геохимическим работам. Существует и чисто техническая, но не менее важная область геохимической стандартизации — например централизованное создание унифицированной тары для всех видов геохимических проб, стандартных сит для металлометрических проб, включающих их заражение, и т. д.

Организация геохимических поисков, структура и функции геохимической службы одинаковы в различных территориальных геологических управлениях Сибири. Все основные звенья организации геохимических работ определились в 1955—1965 гг. и с тех пор мало в чем изменились. Везде методической ячейкой, занимающейся одновременно контролем за работами, является Центральная геохимическая партия. Основной объем геохимических работ выполняют геологосъемочные и поисковые партии, подотчетные в части методики, а иногда направления, эффективности и качества геохимических поисков Центральным геохимическим партиям.

Сейчас все острее ощущается, что эта давно сложившаяся структура геохимической службы, удовлетворительно согласовавшаяся с задачами начального периода освоения геохимических методов, мало способствует дальнейшему их развитию, решению новых задач и поэтому нуждается в усовершенствовании. При этом в первую очередь должны быть учтены следующие моменты. Во-первых, по сравнению с начальным периодом

развития геохимических поисков в настоящее время оильно возрос их удельный вес, расширился ассортимент методов. В БТГУ затраты на геофизические и геохимические работы стали примерно равными. Контроль за качеством ежегодного объема геохимических работ стал непосильным для одной Центральной геохимической партии. Во-вторых, существенно изменились задачи геохимических методов поисков. Теперь, за исключением мезокайнозойских впадин, уже не осталось площадей, где в том или ином масштабе не проводились бы геохимические исследования, и становится ясно, на какие элементы и в каких именно местах территория Бурятии остается слабо изученной. В последние годы начал развиваться новый вид работ — геологическое и геохимическое доизучение (пересъемка) ранее изученных площадей. Растет спрос на геохимические методы при разведочных работах.

При всем этом наиболее существенно то, что доизучение ориентируется на полузакрытые типы районов, так как почти все открытые районы (за исключением труднодоступных) уже достаточно полно опоскованы. Почти все наиболее перспективные аномалии в открытых районах с поверхности получили оценку или на них запланированы первоочередные работы. Настало время браться за слабопроявленные аномалии, подавляющая часть которых размещается в плохоблаженных районах, где широко развиты какие-либо покровные отложения (солифлюкционные, дефлюкционные) в сочетании с аллохтонными образованиями или без них.

Все это вызывает необходимость специализации поисковых геохимических работ и создания новых производственных специализированных геохимических подразделений. Одно из них должно заниматься автоматизированной обработкой и интерпретацией всей новой геохимической информации, ежегодно поступающей из всех партий, и выделением наиболее перспективных участков. Ежегодно в Бурятском геологическом управлении необходимо обрабатывать не менее 2 млн. элементо-определений, исходя из того, что за один полевой сезон отбирается около 200 тыс. только различного рода металлотрических проб. Такую работу можно выполнить только на ЭВМ. В Бурятии эту важнейшую задачу предполагается решать с помощью Института геохимии им. академика А. П. Виноградова СО АН СССР и ВЦ Иркутского университета им. А. А. Жданова. Основная задача при машинной обработке геохимической информации — выявить закономерности распределения рудовмещающих структур и наметить участки детальных поисковых работ в сложных природных условиях. Одновременно следует создать банк данных, характеризующих различные рудные месторождения, хорошо изученные в геохимическом отношении.

Задачи второго производственного геохимического подразделения — полевая разбраковка и оценка геохимических аномалий с использованием всех современных критериев и способов. В настоящее время, как и ранее, решение данной задачи представляется наиболее сложной частью всего цикла поисковых геохимических работ.

Еще одной важной проблемой совершенствования геохимических поисков служит ускорение обработки проб и сокращение сроков их анализа. В настоящее время эти виды работ по своей длительности значительно превосходят трудоемкий процесс отбора проб, а также время составления геохимических карт на ЭВМ. Разрыв во времени между отбором и анализом проб возрастает по мере роста скорости проходки скважин и расширения механизированного способа проходки горных выработок. Наиболее радикальное решение вопроса — создание автоматизированного способа обработки проб и увеличение производительности анализа.

Важнейшими вопросами, решение которых может существенно способствовать повышению эффективности геохимических исследований, является организация подготовки специалистов по геохимическим мето-

дам поисков в вузах и техникумах, а также создание территориальных центров по повышению квалификации кадров, занятых на геохимических работах.

*Бурятское территориальное
геологическое управление, г. Улан-Удэ*

В. К. ЛУКАШЕВ, К. И. ЛУКАШЕВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ В БЕЛОРУССИИ

Руднопоисковые геохимические методы впервые начали применяться советскими геологами в начале 30-х годов. Одним из основателей этого способа поиска месторождений является Н. И. Сафронов (1936, 1971), внесший крупный вклад в его практическую и теоретическую разработку. За полвека в результате большой творческой работы советских и иностранных исследователей создана разветвленная система приемов прикладной поисковой геохимии и значительно расширены географические границы их применения.

Большинство геохимических методов, применяемых в поисковой практике Белоруссии, не получило еще должной разработки и апробации с учетом местных геологических и ландшафтных условий (это относится как к поверхностным, так и к глубинным методам поисков). В то же время геохимическое изучение земной коры Белоруссии и использование названных методов во многих случаях играли определенную роль в открытии и изучении эндогенных и экзогенных месторождений полезных ископаемых, в характеристике их вещественного состава и закономерностей распределения химических элементов в месторождениях и связанных с ними первичных и вторичных ореолов и потоков рассеяния.

За советское время накоплено большое количество материала, позволяющего с большей или меньшей достоверностью характеризовать строение земной коры Белоруссии, ее стратиграфию, тектонические структуры, петрографо-минералогические и геохимические особенности [Лукашев и др., 1977].

Выявлены и широко используются в народном хозяйстве такие полезные ископаемые, как калийные соли, нефть, различные строительные материалы, торф и сапропели. Продолжаются поиски и разведка месторождений угля, горючих сланцев, железных руд, фосфоритов. Предстоит расширение поисков и разведки рудопроявлений каолинов, бокситов, ряда цветных, редких и рассеянных металлов (медь, свинец, цинк, никель, кобальт и др.), связанных с кристаллическими породами, корами выветривания и осадочными отложениями.

Исключительным петрографо-минералогическим и геохимическим разнообразием характеризуются фациальные комплексы кристаллического фундамента и осадочной толщи республики. Кристаллические породы представлены гнейсами, гранито-гнейсами, биотитовыми гранитами, магматитами, базальтами, диабазами, туфами, продуктами метаморфизации и метасоматизации интрузивных и осадочных пород. Для них характерны сульфидная, карбонатно-кварцевая сульфидная, медноколчеданная и другие типы рудной минерализации с пиритом, халькопиритом, пентландитом, молибденитом, магнетитом, ильменитом, флюоритом и др.

Геохимический состав и закономерности распределения элементов в осадочной толще территории Белоруссии в целом изучены недостаточно. Исключением являются кайнозойские и девонские отложения Припятской

впадины, геохимическая характеристика которых содержится в работах многих белорусских авторов [Лукашев, 1972; Лукашев и др., 1974; Лапуть, 1970; Бордон, 1976; Геохимические исследования..., 1977].

В аспектах поисков и разведки полезных ископаемых геологически, геофизически и геохимически более полно изучены минеральные богатства недр Припятской впадины и южной зоны Белорусского кристаллического массива.

ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Ввиду большой мощности осадочного чехла в БССР очень мало районов, пригодных для использования геохимических методов поисков непосредственно с поверхности. К ним относятся прежде всего территория юга БССР, прилегающая к Украинскому кристаллическому щиту, Микашевичско-Житковичский горст, где мощность осадочного чехла на породах фундамента местами снижается до 20 м и менее. Площадь с мощностью чехла не более 50 м занимает здесь примерно 1000 км². Возможно сочетание новейших поверхностных геохимических методов с бурением мелких скважин в ближайшие годы может оказаться эффективным для поисков на данной территории.

Хотя литогеохимические методы наиболее широко применяются в поисковой геологии, их использование в обычном варианте (с отбором проб с глубины до 1 м) на территории Белоруссии практически бесперспективно ввиду развития мощного осадочного чехла. По этой же причине мало перспективен и гляциофокусный метод, основанный на анализе веера рассеяния рудных элементов в морене (в Белоруссии мощный покров четвертичных отложений — до 350 м и более — представлен несколькими горизонтами морен).

В республике также редко выходят на поверхность породы кристаллического фундамента, с которым связаны основные металлические полезные ископаемые. Малоперспективны в отношении поисков по вторичным ореолам рассеяния мощные, практически безбарьерные пески водно-ледникового и аллювиального генезиса.

Благодаря проведенным в последнее время геохимическим исследованиям, в четвертичном покрове Белоруссии и Прибалтики выявлены некоторые геохимические аномалии (свинца, цинка и меди), на которых основано предположение свинцово-цинковых месторождений в девонских отложениях на территории Эстонии (этот тип может быть обнаружен и в северной части Белоруссии); титана, меди, хрома, приуроченные к областям сноса и размыва кристаллических пород Белорусского и Украинского кристаллических массивов; титана и циркония, приуроченные к пляжевым россыпям граната, рутила, лейкоксена, циркона; меди, никеля, цинка и фосфора в железо-марганцевых конкрециях Рижского залива; повышенные содержания титана, меди и циркония в осадках рек, перемывающих флювиогляциальные и озерно-ледниковые отложения последнего валдайского оледенения на территории Белорусского Поозерья.

Поисковые работы на россыпи в регионе рекомендуется сочетать с глубокими геохимическими исследованиями, включающими изучение форм концентрации элементов в осадках, минеральных новообразованиях, отдельных компонентах органического вещества, солевых вытяжках и терригенных породообразующих и рудных минералах. Существенное значение имеет детальное исследование кларковых содержаний во всем комплексе осадков.

В последние годы в бассейне Немана выявлен ряд аномалий, связанных с погребенными аллювиальными комплексами отложений различного возраста. Так, среди отложений древнего плейстоцена, приуроченных к

ложбинам ледниковой экзарации, установлены аномалии меди (контрастностью до 1,1—3,5), никеля (5,1—20,0), кобальта (1,5—6,5), хрома (1,4—2,5), титана (2,0—3,0), ванадия и марганца (до 1,4) в гляциаллювиальных, озерно-аллювиальных и озерных песках. Аномалии приурочены к местам размыта белорусской морены, эродировавшей архей-протерозойские породы фундамента, осадки мела и палеогена.

Следует отметить, что с каждым годом возрастает сфера применения геохимических методов, поэтому в будущем, вероятно, более совершенное геохимическое опробование и исследование четвертичной толщи Белоруссии и Прибалтики может дать много сведений о наличии неметаллических полезных ископаемых, скрытых во всей осадочной толще региона. ■

В последние годы в некоторых странах (особенно Канаде) начинает широко распространяться метод опробования донных отложений озер с целью поисков скрытых под ними полезных ископаемых. Этот метод, особенно в комплексе с исследованиями состава сапропелей для нужд сельского хозяйства, опробованием озерных россыпей тяжелых минералов и других отложений может найти применение и в условиях БССР, где имеется около 10 300 озер. При проведении поисковых работ УГ при СМ БССР на севере республики в отложениях девона в мергельно-меловой толще обнаружены отдельные аномалии меди, ванадия, кобальта, стронция и других металлов. В некоторых случаях эти породы залегают на значительных глубинах (10—15 м), что делает вполне возможным развитие вторичных наложенных ореолов рассеяния металлов в донных отложениях. В связи с этим опробование озерных отложений может представить практический интерес.

Известно, что в озерных котловинах часто происходит разгрузка подземных вод, несущих информацию из более глубоких горизонтов. На юге БССР, например, наблюдаются случаи выходов в озерные водоемы сильно минерализованных вод из девонских отложений.

Имеются работы, в которых предполагается влияние очень крупных водоемов, таких как большие искусственные водохранилища, на процессы происходящие в глубине земной коры [Сейсмичность..., 1978]. По-видимому, более глубокое значение этих процессов в сочетании с новыми приемами изучения озерных отложений и подземных вод могут дать ценные сведения о химическом составе недр. В настоящее время авторами проведены первые рекогносцировочные исследования содержания ряда металлов в озерных илах Белоруссии, охарактеризован фон элементов и намечен ряд аномалий, природа которых изучается.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПОИСКОВ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ЭЛЕМЕНТОВ ВО ВТОРИЧНЫХ ОРЕОЛАХ РАССЕЯНИЯ

Значительно увеличить глубинность поисков позволяют методы, основанные на анализе различных подвижных форм нахождения элементов во вторичных ореолах рассеяния. Авторами были проведены опытно-методические работы на одном из участков гумидной зоны, которые включали в себя испытание таких методов, как солянокислые вытяжки, опробование металлоорганических комплексов и новый разработанный авторами метод с применением искусственных сорбентов [В. К. Лукашев, К. И. Лукашев, 1978].

Значение опытно-методических или экспериментальных поисков подчеркивается во многих работах. В эту задачу входит выяснение таких важных вопросов, как тип геохимического рассеяния, который встречается в данном районе, определение перспективных участков, на которых

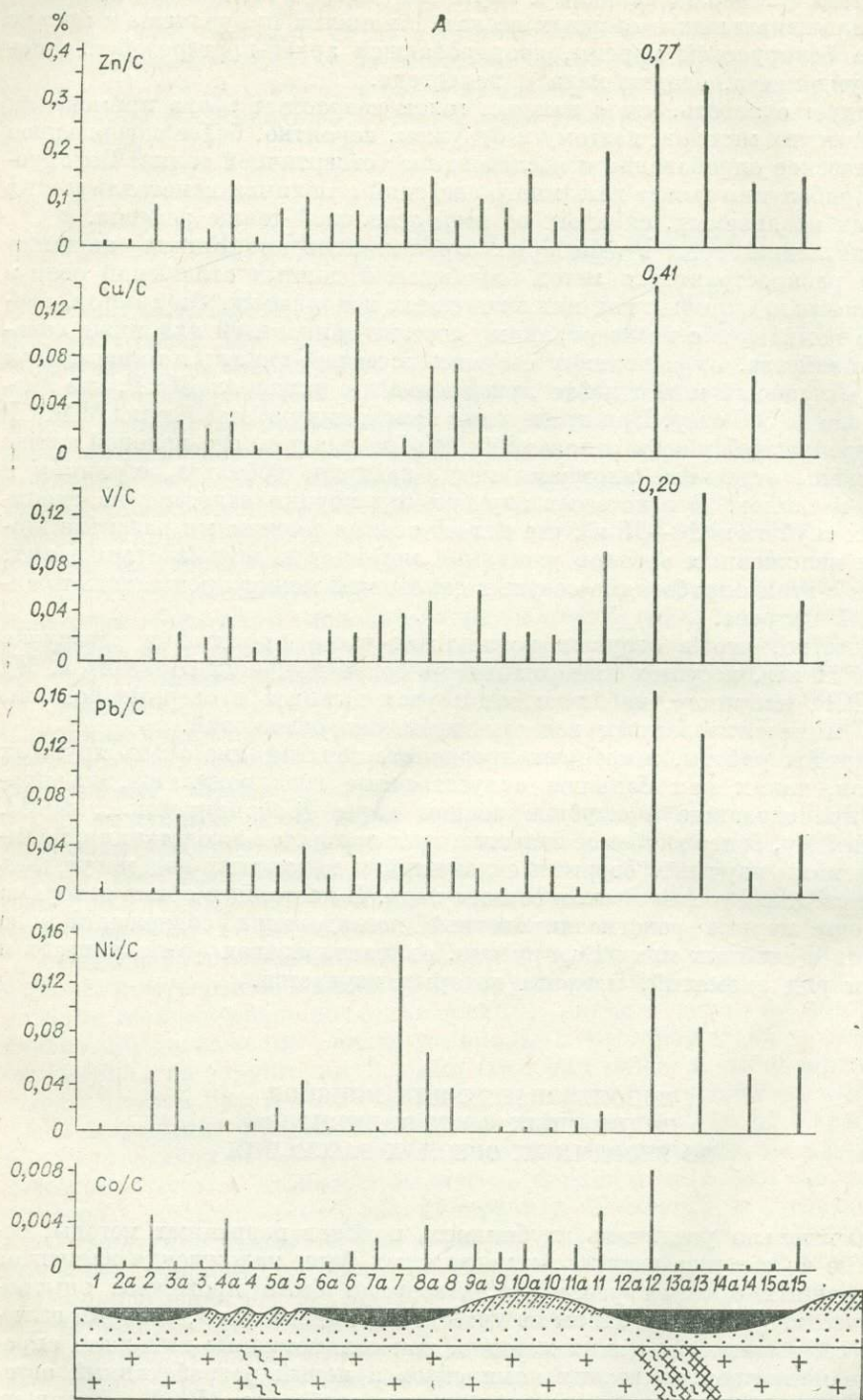
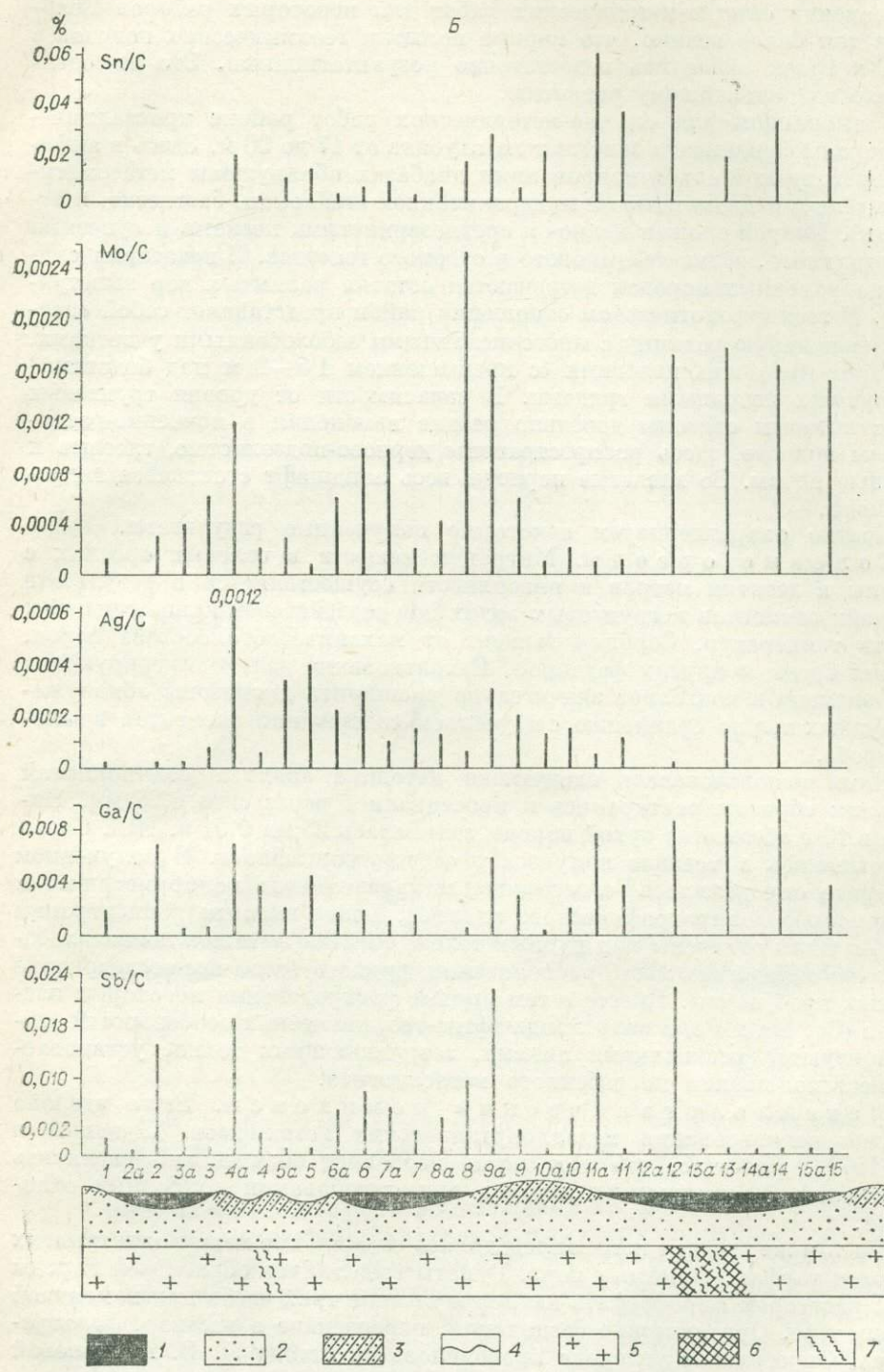


Рис. 1. Содержание цинка, меди, ванадия, никеля, кобальта (A) и олова, мо
 фьяно-почвен
 1 — торф; 2 — песок; 3 — гумусированный песок; 4 — кочкарник; 5 — породы кристал-



либдена, серебра, галлия, сурьмы (B) в металлоорганическом комплексе торного покрова.

лического фундамента; 6 — рудоносные метасоматиты; 7 — зона милонитизации и катаклаза.

можно вести поиски, виды поисковых работ, аналитических и качественных параметров, с помощью которых можно отличить аномалию от фона и т. д.

Значения опытно-методических работ для некоторых районов Белоруссии тем более велико, что первые попытки геохимических поисков в 50—60-х годах оказались недостаточно результативными. Это не содействовало их дальнейшему развитию.

В выбранном для опытно-методических работ районе кристаллические породы фундамента залегают на глубине от 17 до 30 м. Здесь в амфиболитизированных и альбитизированных диабазах обнаружены метасоматические тела с редкометальной минерализацией (лейкофан, бастнезит, гентгельвин). Покров сложен мелко- и среднезернистыми песками и супесями аллювиального, водно-ледникового и озерного генезиса. В некоторых случаях на коренных породах встречаются остатки размывших кор выветривания. В геоморфологическом отношении район представляет собой озерно-аллювиальную равнину с многочисленными заболоченными участками, разделенными очень пологими (с превышением 1,5—2 м над болотами) вытянутыми песчаными грядами. В зависимости от уровня грунтовых вод, с которым связаны довольно резкие изменения в почвенно-растительном покрове, здесь распространены дерново-подзолистые, глеевые и болотные почвы. Во влажные периоды весь ландшафт становится гидроморфным.

Кратко охарактеризуем некоторые полученные результаты.

Солевые ореолы. Миграция веществ в солевых ореолах с глубины в десятки метров к поверхности осуществляется в результате диффузии элементов в грунтовых водах под воздействием концентраций и отчасти температур. Сорбция зависит от механического состава пород, условий среды и других факторов. Использование далеко мигрирующих форм элементов позволяет значительно расширить диапазоны обнаружения рудных тел по сравнению с изучением содержаний элементов в валовой пробе.

Нами использовалась следующая методика анализа солянокислой вытяжки: образцы растирались и просеивались через сито 0,25 мм. Навеска в 10 г абсолютно сухой породы заливалась 25 мл 0,01 н. HCl. Смесь взбалтывалась в течение получаса и отфильтровывалась. В полученном фильтрате определялось содержание микроэлементов колориметрически и с помощью полярографического анализа. Более высокие концентрации Ni и Zn были отмечены над рудным телом. Анализ вытяжек позволял более точно определить место расположения рудного тела, чем исследование валовых проб почвы. Вместе с тем кривые распределения некоторых элементов (Co, Mn и Fe) в силу ландшафтно-геохимических особенностей характеризуются несколькими пиками, затрудняющими точное установление местоположения погребенного метасоматита.

Металлоорганические комплексы. Была сделана попытка использования металлоорганических комплексов [Лукашев и др., 1977]. Известно, что этот метод позволяет значительно увеличить глубинность геохимических методов при опробовании покровных отложений.

На том же участке нами определялось содержание металлов в гуматах торфов и торфяно-болотных почв. Гуматы выделялись обработкой породы 0,1 М раствором пирофосфата натрия в течение трех часов при комнатной температуре. Органические соединения, перешедшие в раствор, фильтровались. Определение углерода проводилось по методу Л. В. Антроповой (1975). Для исключения погрешностей неполного выделения гуматов в пробах содержание микроэлементов относили к количеству углерода в определенном объеме ($Me/C_{орг} \cdot 100$). Микроэлементы определялись полярографическим методом и путем соосаждения пирофосфатной вытяжки с сульфидом кадмия со спектральным окончанием.

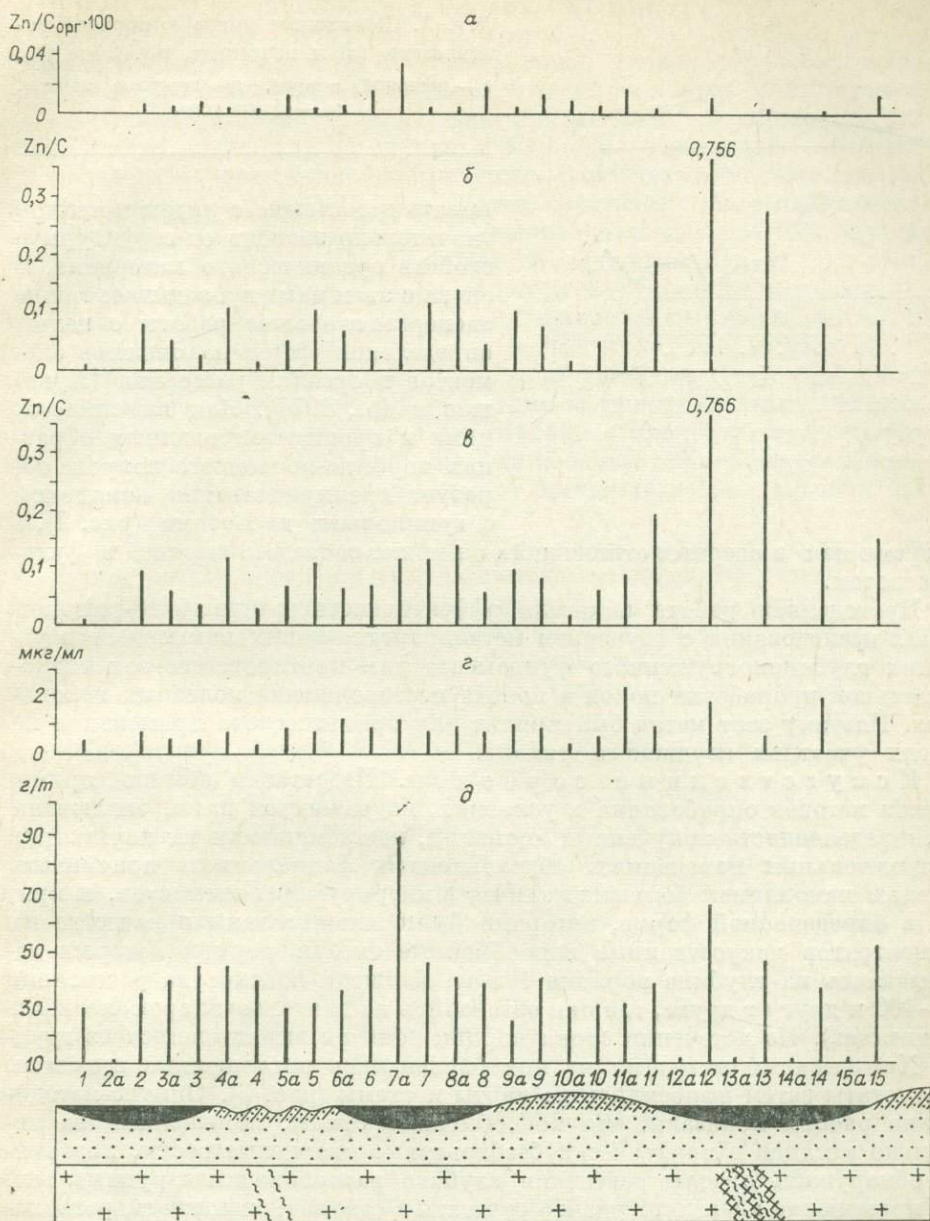


Рис. 2. Формы нахождения цинка в торфяно-почвенном покрове.

a — цинк в фульвокислотах; *б* — цинк в гуминовых кислотах; *в* — цинк в гуматах; *г* — цинк в НСI-вытяжках; *д* — валовое содержание цинка в породе. Усл. обозн. см. на рис. 1.

Бериллий был обнаружен в нескольких пробах почв, в точках, близких к тем, где он также находился в растениях.

В районе предполагаемого выхода рудоносных метасоматитов на древнюю эрозионную поверхность выявлены четкие пики в распределении цинка, кобальта, свинца, ванадия, меди, олова, молибдена и сурьмы (рис. 1). Однако следует отметить, что кривые распределения меди, олова, молибдена, сурьмы характеризуются несколькими пиками, которые, возможно, связаны с ландшафтными условиями и особенностями эндогенного ореола.

Элементы в органическом веществе почв и торфов преимущественно закрепляются в виде гуматов и фульватов. Способность гумуса образо-

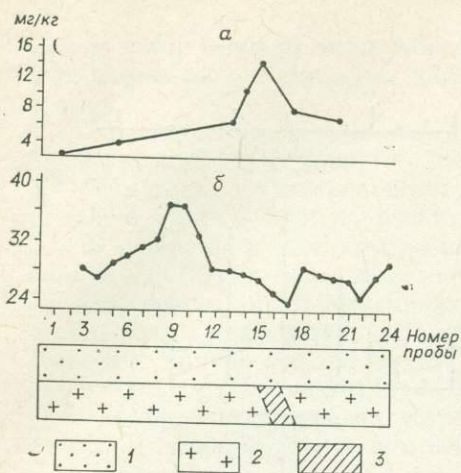


Рис. 3. Содержание цинка в ионообменной смоле (а) и почвенном горизонте (б). 1 — песчаный покров, 2 — коренные породы, 3 — рудное тело.

вызвать комплексы с рядом металлов значительно зависит от структуры и свойств органического материала. В связи с этим нами проводились также экспериментальные работы с целью определения форм нахождения элементов в ореолах рассеяния [Лукашев и др., 1977]. Как выяснилось, цинк в проанализированных образцах торфяно-почвенного покрова образует преимущественно комплексы с гуминовыми кислотами (рис. 2), в

то время как в озерных отложениях он может сосредоточиваться в фульвокислотах.

Проведенная работа показала эффективность ландшафтно-геохимических исследований с изучением металлоорганических комплексов в условиях глубокопогруженного фундамента для картирования зон гидротермальной проработки пород и поиска месторождений полезных ископаемых. Поэтому этот метод был принят для практического применения на других участках изучаемого района.

Искусственные сорбенты. Недостатки обычно применяемых методов опробования в условиях, изучавшихся нами, заключены в неопределенности полученных аномалий, нестабильности их параметров и значительных изменениях, обусловленных фациальными причинами. С целью накопления больших количеств мигрирующих элементов, и притом в определенной форме, авторами были использованы в качестве их концентратов искусственные ионообменные смолы, порции которых закапывались на глубине порядка 1 м на площади поисков на расстоянии 50—100 м друг от друга, где они оставались на длительный срок (несколько месяцев). По истечении срока порции ионитов выкапывались из грунта. Химическими методами из них извлекались поглощенные вещества. Результаты затем выносились на карты и схемы (рис. 3). Опытные-методические работы показали, что ионообменные смолы, помещенные на несколько месяцев в практически безбарьерные кварцевые пески, позволяют обнаружить ореолы рассеяния глубоко расположенных рудных тел. Их применение позволяет удачно сочетать в себе возможности гидрогеохимического и сорбционного методов поисков [В. К. Лукашев, К. И. Лукашев, 1978].

При геохимических поисках в некоторых случаях обнаруживаются ложные аномалии техногенного происхождения, поэтому для успешного ведения поисков нужно учитывать и более детально изучать источники образования и распространения этих аномалий. Наряду с существующими приемами их распознавания (сравнение проб из поверхностных и более глубоких горизонтов почв и донных осадков, отношений содержания элементов в различных вытяжках, анализ пространственной формы аномалии, отношений между родственными элементами и т. д.) определенную помощь могут оказать искусственные сорбенты. Как показали исследования авторов, некоторые элементы (например, цинк) находятся в техногенных и природных ореолах рассеяния в различных формах, что фиксируется по их содержанию на различных типах смол (анионитах и катионитах).

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Использование биогеохимических методов наиболее целесообразно, когда малоэффективно использование других лито- и гидрогеохимических методов. Опробуемые растения должны принадлежать к одному из распространенных видов (или их группе) и быть одновозрастными; желательно использовать комплекс биокомпонентов (растительность, лесная подстилка, гумус, торф и др.); необходимо учитывать биогеохимические свойства элементов, их способность концентрироваться в разных органах и частях растений и т. д. [В. Лукашев, К. Лукашев, 1967].

Проведенные на Житковичском горсте и на Украинском кристаллическом щите методические работы по применению биогеохимических методов показали, что в ряде случаев по повышенному содержанию олова, меди, никеля и других элементов в золе растений (березы и сосны) удается отметить контакты между гранитами и гранитизированными туфо-конгломератами, расположенными на глубине около 30 м. Было обнаружено, что в некоторых пробах содержания кобальта, хрома, никеля, меди, цинка, молибдена, олова и свинца могут достигать весьма высоких значений [Бордон и др., 1972].

Нами проводилось биогеохимическое опробование на содержание ряда элементов (Zn, Be, Cu и др.) на опытно-методическом участке, который описывался выше. Интервалы между точками отбора составили 10 и 20, на флангах вне рудной зоны — 40 м. Опробовались кора сосны, ветки ольхи и березы, черничник, торф, почвенные горизонты (А и В). Пробы озолялись и исследовались по стандартной методике. Цинк, медь, и фтор определялись химическими методами. Бериллий определялся также параллельно спектральным методом, с помощью которого было изучено содержание ряда других элементов.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы. Бериллий и редкие земли обнаружены в золе ольхи и торфяно-почвенного горизонта в очень низких количествах (0,0001%). Во многих пробах содержание этих элементов ниже чувствительности метода. Однако одновременное присутствие бериллия и редких земель в параллельных пробах растений и почвы позволяет предположить их связь с зонами рудоносных метасоматитов. Более контрастные ореолы образуют такие спутники бериллиевого оруденения, как цинк, медь и др. Опытные-методические исследования показали, что при использовании биометодов можно добиться лучших результатов как за счет комплексирования их с другими методами, так и путем тщательного подбора видов опробуемых растений.

Некоторые геохимические методы поисков не получили еще широкой апробации в условиях БССР (например, атмогеохимические, за исключением некоторых нефтепоисковых работ). Особенно они эффективны при поисках радиоактивных руд, гелия, углеводородов, ртути, полиметаллических месторождений.

Вероятно, дальнейшее развитие гидрогеохимических методов также значительно содействовало бы прогрессу при глубинных поисках месторождений. Оценка их эффективности и результатов применения на территории Белоруссии приводится в работах А. П. Лаврова, В. В. Толкача и Л. И. Шаповалова (1972), Заржицкого и Л. Н. Богомоловой (1972). Однако в последние годы применение их не расширялось.

Открытие новых крупных месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых — главная задача геологической службы и научных учреждений республики на ближайшие годы. В этом плане должны решаться многие проблемы и вопросы, относящиеся к стратегии и методам поисково-разведочных работ.

Необходима организация геологопоисковых работ на комплексной основе, т. е. геохимические методы должны применяться в самом тесном переплетении с геологическими, геофизическими и горнобуровыми рабо-

тами. Изолированное использование геохимических методов не во всех случаях может обеспечить высокую эффективность и достаточную отдачу. Геологопоисковая практика в СССР и за рубежом показывает, что наибольшая эффективность применения геохимических методов получается там, где эти методы используются на всех этапах и стадиях геологоразведочного процесса (прогнозный, предварительной и детальной разведки месторождений).

Очевидно, что наибольший успех геологопоисковых работ в открытии новых крупных месторождений полезных ископаемых может быть достигнут при сплошной геохимической съемке территории, аналогичной геологической, с разной степенью детальности и выделением различных типов геохимических территорий.

Институт геохимии и геофизики АН БССР, г. Минск

Б. Ф. МИЦКЕВИЧ

УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ НА УКРАИНЕ

Территория Украинской ССР характеризуется сложным геологическим строением и расположена в пределах нескольких физико-географических зон, что определяет неоднородность условий применения геохимических методов поисков.

Условия применения геохимических методов поисков по экзогенным оре

Ландшафтно-геохимические районы	Характер увлажнения
Северо-западная часть Украинского щита	Достаточное увлажнение, $K=1,0-1,2$
Центральная часть Украинского щита	Недостаточное увлажнение, $K=0,5-1,0$
Приазовская часть Украинского щита	Засушливая зона, $K=0,5$
Галицко-Волынская впадина и северная часть Вольно-Подольской плиты	Достаточное увлажнение, $K=1,0-1,2$
Северная часть Днепровско-Донецкой впадины	Достаточное увлажнение, $K=1,0-1,2$
Центральная часть Днепровско-Донецкой впадины	Недостаточное увлажнение, $K=0,5-1,0$
Донецкий кряж	Недостаточное увлажнение, $K=0,75-1,0$
Южная часть Вольно-Подольской плиты и Предкарпатский прогиб	Достаточное увлажнение, $K=1,0-1,2$
Юго-западный склон Украинского щита и Молдавия	Недостаточное увлажнение, $K=0,5-0,75$
Причерноморская впадина	Засушливая зона $K = 0,5$
Карпаты	Избыточное увлажнение, $K=1,2$
Горный Крым	Избыточное увлажнение, $K=1,2$
Закарпатская впадина	Достаточное увлажнение, $K=1,0-1,2$
Степной Крым	Недостаточное увлажнение, $K=0,5-0,75$

Примечание. Условия применения геохимических методов: (—) неблагоприятные, на основании величины годовой суммы осадков к величине испаряемости.

В геологическом строении территории республики выделяются две части: платформенная и геосинклинальная. Первая является юго-западной окраиной Русской (Восточно-Европейской) платформы, которую с юга и юго-запада обрамляют геосинклинальные структуры альпийского возраста. В ее пределах выделяют Украинский кристаллический щит, Днепровско-Донецкую впадину, складчатые сооружения Донбасса, Причерноморскую впадину, Львовско-Волинскую впадину Волино-Подольскую плиту. К геосинклинальным структурам относятся Карпаты с Предкарпатской и Закарпатской впадинами, Горный Крым и структуры, прилегающие к нему.

Каждая из перечисленных структур характеризуется своими металлогеническими особенностями, составом пород, мощностью и генезисом четвертичного покрова. Это определило необходимость оценки территории Украины в отношении применимости и условий ведения геохимических методов поисков. В результате проведенного ландшафтно-геохимического районирования территория Украины была разделена на 14 районов (см. таблицу). Однако проведенное районирование не могло служить основой для выполнения детальных геохимических съемок. Поэтому очередной задачей явилось изучение условий ведения геохимических поисков в пределах структур, которые по своим металлогеническим особенностям являются наиболее перспективными для выявления новых месторождений рудных полезных ископаемых. К ним относятся Донбасс, Карпаты и, в первую очередь, Украинский щит.

олам рассеяния территории Украины и Монголии [Мицкевич, 1965]

Рельеф	Характер и мощность четвертичных отложений	Условия применения геохимических методов поисков		
		литогеохимического	гидрогеохимического	биогеохимического
Ледниковая равнина	Ледниковые, флювиогляциальные до 10 м	+	++	++
Лессовая равнина, расчлененная	Лессовые до 30 м	-	++	-
Лессовая равнина, расчлененная	Лессовые до 20 м	+	+	+
Ледниковая равнина	Флювиогляциальные, лессовые до 15 м	-	++	++
Ледниковая равнина	Ледниковые, флювиогляциальные до 30 м	-	++	++
Лессовая равнина, расчлененная	Лессовые до 70 м	-	+	-
Денудационная равнина, расчлененная	Элювиально-делювиальные до 15 м	++	-	+
Аллювиальная равнина	Аллювиальные до 30 м	-	++	+
Денудационная равнина, расчлененная	Элювиально-делювиальные до 30 м	-	+	-
Лессовая равнина, расчлененная	Лессовые до 100 м	-	+	-
Горы	Элювиально-делювиальные до 10 м	++	++	++
Горы	Элювиально-делювиальные до 10 м	++	++	++
Аллювиальная равнина	Аллювиальные, озерные до 100 м	-	++	-
Денудационная равнина	Элювиально-делювиальные до 10 м	+	+	+

(++) благоприятные, (+) частично благоприятные. К — коэффициент увлажнения, равный от-

Среди осадочных образований щита выделяют континентальные отложения и осадочные породы палеоген-неогенового и более древнего возраста. Четвертичные отложения сплошным чехлом покрывают территорию щита, в то время как более древние осадки сохранились от последующего размыва не всюду. В Северо-Западной и Приазовской частях щита они наблюдаются лишь в виде небольших островков на склонах кристаллического фундамента. В центральной части щита они распространены значительно шире, а мощность их, определяемая рельефом кристаллического основания, на отдельных участках достигает 50—60 м. Четвертичные отложения по генезису представлены несколькими типами: элювиальным, элювиально-делювиальным, аллювиальным, ледниковым и водно-ледниковым.

Изменение природных условий в пределах щита подчиняется физико-географической зональности, что выражается в образовании широких полос, вытянутых примерно широтно и отличающихся климатическими показателями, растительностью и характером почв. С севера на юг в пределах щита выделяются зоны смешанных лесов (Украинское Полесье), лесостепная и степная, которая делится на подзоны северной и южной степи.

В основу районирования территории Украинского щита по условиям ведения поисков рудных месторождений, связанных с породами кристаллического основания, по экзогенным ореолам и потокам рассеяния были положены принципы ландшафтно-геохимического районирования [Перельман, 1966; Добровольский, 1962]. Исходя из этих принципов, в пределах Украинского щита выделено 5 ландшафтно-геохимических районов, характеризующихся близкими условиями миграции металлов в поверхностных и подземных водах, процессами почвообразования и биологического круговорота. В каждом районе по степени участия химических элементов пород докембрийского основания в процессах современного гипергенеза выделены три типа геохимических ландшафтов: первый характеризуется прямой связью с кристаллическими породами, второй — затрудненной, третий — отсутствием такой связи.

Поверхностные геохимические съемки возможны лишь на площадях первого типа, составляющих 7,4% площади щита. На остальной его территории в связи с мощностью чехла осадочных отложений более 5—10 м геохимические поиски требуют в основном использования глубинных вариантов. Горизонтом опробования при этом является кора выветривания кристаллических пород и в отдельных случаях континентальные отложения палеоген-неогенового возраста [Мицкевич, 1971]. Естественно, что такое районирование в известной степени условно, поскольку связано с решением вопроса о критической мощности осадочного чехла, при котором возможно образование открытых наложенных ореолов рассеяния. Этот вопрос и до настоящего времени продолжает дискутироваться, но проведенное районирование послужило толчком для более детальных ландшафтно-геохимических исследований (О. М. Лепилин, М. М. Кумский, Б. А. Батиевский и др.).

Существенно отличны условия применения геохимических методов поисков в горных районах Украины. Об этом свидетельствуют результаты ландшафтно-геохимических исследований в Карпатах [Сущик, 1978]. Принадлежность к складчатым структурам с покровом современных рыхлых образований элювиально-делювиального происхождения обуславливает преимущественное развитие здесь открытых механических ореолов и потоков рассеяния. Отличает эти районы также то, что на миграцию металлов значительное влияние оказывает вертикальная зональность: изменение физико-географических условий с высотой приводит к геохимической неоднородности горных ландшафтов в пределах одной и той же структурной зоны. Все это существенно влияет на условия применения геохимических методов. Если в пределах высоко- и среднегорных ландшафтов

условия благоприятствуют применению всех видов поверхностных геохимических съемок, то низкогорные ландшафты накладывают на их использование определенные ограничения.

Касаясь в целом состояния изучения условий применения геохимических методов поисков на территории Украины, следует признать, что оно еще далеко не окончено. До настоящего времени отсутствуют карты применимости этих методов для таких рудных регионов, как Донбасс, Закарпатье и др.

В основе изучения условий применения геохимических методов поисков лежат ландшафтно-геохимические исследования, являющиеся фундаментом этих методов и главным источником повышения их эффективности. Опережающие ландшафтно-геохимические исследования должны стать обязательной составной частью всех видов геологических работ, в ходе которых применяются геохимические методы поисков [Мицкевич, 1976].

Институт геохимии и физики минералов АН УССР, г. Киев.

- Антощенко-Оленев И. В.** Кайнозой Джидинского района Забайкалья. Новосибирск, Наука, 1975. 126 с.
- Антропова Л. В.** Формы нахождения элементов в ореолах рассеяния рудных месторождений. Л., Недра, 1975. 144 с.
- Антропова Л. В., Недригайлова М. В., Шуралева А. З.** Определение форм нахождения меди в горных породах (методические указания). Л., изд. ВИТР, 1970. 28 с.
- Аранга Р.** Состояние медной промышленности.— Реф. журн. Геология, 1958, № 5, с. 153—154.
- Барсуков В. Л.** О металлогенической специализации гранитоидных интрузий.— В кн.: Химия земной коры. Т. II. М., Недра, 1964, с. 196—214.
- Белякова Е. Е., Резников А. А., Крамаренко Л. Е., Нечаева А. А., Кронидова Т. Ф.** Гидрохимический метод поисков рудных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1962. 268 с.
- Бент О. И., Лешилин О. М.** Анализ геохимической изученности западной и центральной частей Украинского щита, Вольно-Подолли и Украинских Карпат.— Геологический журнал, 1978, т. 38, № 5, с. 124—132.
- Белов И. В.** Трахибазальтовая формация Прибайкалья. М., Изд-во АН СССР, 1963. 371 с.
- Беус А. А., Ситнии А. А.** Геохимические особенности гранитоидов кукульбейского интрузивного комплекса в Восточном Забайкалье.— Советская геология, 1967, № 9, с. 104—109.
- Боев Н. И.** Гидрогеологические критерии поисков и разведки руд в Береговском районе Закарпатья.— Геологический журнал, 1971, т. 31, № 1, с. 68—79.
- Боголюбов А. Н., Загоскин В. А., Кувтырева В. А., Макаровичина З. П., Петров П. А., Соловарова Г. П., Тестов В. И., Фунтиков Л. А., Шмакин Б. М.** Применение геофизических и геохимических методов при поисках и разведке месторождений мусковита.— В кн.: Вопросы геологии, поисков и разведки мусковитоносных пегматитов. М., Недра, 1970, с. 101—108.
- Боев Н. И.** Опыт проведения гидро- и фитогеохимических поисков скрытого оруденения в Береговском районе Закарпатья.— В кн.: Тезисы докладов XV научно-технической конференции ВЗПИ. М., Высшая школа, 1973, с. 41—42.
- Божинский А. П.** Четвертичная базальтовая эффузия в долине р. Джиды. Юго-Западное Забайкалье.— Изв. АН СССР. Серия геол., 1941, № 6, с. 50—59.
- Болотникова И. В., Миллер А. Д.** Определение микросодержаний валового и воднорастворимого золота в горных породах. Л., изд. ВИТР, 1969. 11 с.
- Бордон В. Е.** Геохимическая специализация девонских отложений Припятской впадины. Минск, Наука и техника, 1976. 129 с.
- Бордон В. Е., Заржицкий Г. Ф., Матрунчик Л. И., Макаров В. Г.** О методике и результатах биогеохимических и гидрогеохимических поисков рудных полезных ископаемых в пределах БССР.— В кн.: Применение ландшафтно-геохимических методов исследований в Прибалтике и Белоруссии. Минск, Наука и техника, 1972, с. 16—22.
- Борисенко С. Т., Галецкий Л. С., Мицкевич Б. Ф.** Состояние и задачи геохимических исследований на Украине.— Геологический журнал, 1971, т. 31, № 1, с. 3—12.
- Боровицкий В. П., Миллер А. Д., Шемякин В. Н.** Определение малых количеств золота в природных водах Алданского района.— Геохимия, 1966, № 4, с. 483—488.
- Бродский А. А.** Основы гидрогеохимического метода поисков сульфидных месторождений. М., Наука, 1964. 259 с.
- Бугаец А. Н.** Статистические методы принятия решений в задачах поиска и оценки пегматитов по геохимическим данным.— Геология и геофизика, 1968, № 12, с. 65—73.

Булнаев К. Б. Флюоритовые месторождения Западного Забайкалья. Новосибирск, Наука, 1976. 117 с.

Бурдэ Б. И., Каипов Г. М., Грехнев Н. И., Катышкин А. С. Генетические типы и фации склоновых образований и классификация механических ореолов рассеяния для условий горно-таежных ландшафтов зоны островной многолетней мерзлоты. — В кн.: Вторичные ореолы рассеяния и их использование при поисках месторождений на территории Сибири. Улан-Удэ, Бурят. кн. изд-во, 1973, с. 94—107.

Варданын К. Р. Теоретическое обоснование возможности применения йода в качестве элемента-индикатора для поисков «слепых» рудных тел на примере некоторых медноколчеданных месторождений Армянской ССР. Автореф. канд. дис. Ереван, 1971. 24 с.

Вейсе О. Аэрогеохимические поиски. — В кн.: Геохимические поиски. М., Мир, 1973, с. 280—296.

Веригин М. И., Бурцева З. А., Касьянова И. В. Опыт применения гидрогеохимического метода при поисках сульфидных месторождений в Среднем Приднепровье. — Геологический журнал, 1971, т. 31, № 1, с. 53—62.

Вершковская О. В., Миллер А. Д., Крапива Л. Я. Йод в породах и рудах ртутных месторождений. — В кн.: Новые данные по минералогии и геохимии редких элементов. М., изд. ИМГРЭ, 1974, с. 36—43.

Викторова Н. А. Опыт применения гидрогеохимического метода поисков в северо-западной части Украинского щита. — Геологический журнал, 1971, т. 31, № 1, с. 62—68.

Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. — Геохимия, 1962, № 7, с. 555—571.

Виноградова Н. А., Григорян С. В., Розенберг Д. Ш. Редкие щелочи как индикаторы скрытого оруденения. — В кн.: Геохимические методы при поисках и разведке рудных месторождений. Вып. 2. М., изд. ИМГРЭ, 1971, с. 80—87.

Вострокнутов Г. А., Юшков Ю. Н. Опыт применения частичного-фазового анализа при литохимических поисках на Среднем Урале. — В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, Наука, 1972, с. 207—217.

Галецкий Л. С. Опыт проведения площадного крупномасштабного геохимического картирования эндогенных ореолов. — Геологический журнал, 1968, т. 28, № 6, с. 50—54.

Галецкий Л. С., Почтаренко В. И., Бочай П. В. Геохимические особенности и мобилизованность докембрийских пород западной части Украинского щита. — Геологический журнал, 1975, т. 35, № 4, с. 42—56.

Геохимические исследования и поиски полезных ископаемых в Белоруссии и Прибалтике. Минск, Наука и техника, 1977, с. 240.

Гинзбург А. И. О минералах — геохимических индикаторах и их значение при поисках руд редких металлов в пегматитах. — Докл. АН СССР, 1954, т. 98, № 2, с. 233—235.

Глебов М. П., Макагон В. М., Макрыгин А. И. Об использовании литохимических методов при поисках пегматитовых жил с редкометалльным оруденением. — В кн.: Материалы II сессии Сиб. секции СГПМ. Вып. 2, ч. 1. Улан-Удэ, 1972, с. 159—160.

Глухов В. А. Эффективность геохимических поисков. М., изд. ИМГРЭ, 1974. 170 с.

Голева Г. А. Гидрогеохимические поиски скрытого оруденения. М., Недра, 1968. 290 с.

Голева Г. А. Гидрогеохимия рудных элементов. М., Недра, 1977. 215 с.

Голева Г. А. Методические основы гидрогеохимических поисков рудных месторождений и задачи их дальнейшего усовершенствования. — Советская геология, 1978, № 5, с. 28—44.

Голубев В. С., Гарибянц А. А. Гетерогенные процессы геохимической миграции. М., Недра, 1968. 192 с.

Григорьев А. М. О возможности использования геохимических методов при поисках золоторудных месторождений. — В кн.: Сборник геолого-производственной информации. № 1, Улан-Удэ, изд. БТГУ, 1959, с. 15—21.

Григорян С. В. Геохимические методы при поисках эндогенных рудных месторождений. М., изд. ИМГРЭ, 1974. 214 с.

Григорян С. В., Радимова Т. Г. Потоки рассеяния Карано-Каджаранского рудного района (Армянская ССР) — В кн.: Ежегодник-1975 СибГЕОХИ, Иркутск, 1976, с. 157—160.

Григорян С. В., Радимова Т. Г., Евдокимова В. Н. Потоки рассеяния медноколчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений Алаверды-Ахтальского рудного района (Армянская ССР) — В кн.: Геохимические поиски месторождений цветных металлов. Новосибирск, Наука, 1979, с. 84—88.

Гроссе Ю. И. Методы определения микроколичества серебра в горных породах с использованием каталитических реакций. Автореф. канд. дис. Л., 1977. 24 с.

Гроссе Ю. И., Миллер А. Д. Кинетическое определение серебра в природных материалах. — Заводская лаборатория, 1974, т. 40, № 3, с. 262—263.

- Гроссе Ю. И., Миллер А. Д., Борисенко Л. Ф., Куриленко Н. М. Комбинированный метод определения серебра в горных породах и минералах с фотометрическим или кинетическим окончанием.— В кн.: Лабораторные и технологические исследования и обогащение минерального сырья. М., экспресс-информация ВИЭМС, 1975, № 4, с. 6—17.
- Добровольский В. В. Ландшафтно-геохимическое районирование Юго-Западного Прибайкалья.— Бюл. МОИП, 1962, вып. XXXVII, с. 98—112.
- Другов Г. М., Карпов И. К., Саинн Б. П. Предварительная обработка геохимических данных методом кластер-анализа.— Геология и геофизика, 1974, № 1, с. 119—123.
- Дубов Р. И. Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1974. 278 с.
- 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.
- Еремеев А. Н., Ключков А. С., Мезенцев О. К. Принципы оценки глубинных геохимических аномалий.— В кн.: Глубинные методы поисков погретенных рудных месторождений (тезисы). Алма-Ата, 1976, с. 21—23.
- Жукова Р. И., Загоскина Е. И. Особенности вторичных ореолов рассеяния золоторудных месторождений территории Восточной Сибири и Забайкалья.— В кн.: Геохимические методы поисков золоторудных месторождений. Чита, 1974, с. 218—222.
- Загорский В. Е. О хлоритизации в экзоконтактах редкометалльных пегматитов.— Докл. АН СССР, 1978, т. 239, № 4, с. 959—961.
- Загорский В. Е., Макагон В. М., Шмакин Б. М. Главные закономерности формирования первичных ореолов редкометалльных пегматитов.— В кн.: Проблемы геохимии эндогенных процессов. Новосибирск, Наука, 1977, с. 145—152.
- Загоскин В. А., Загоскина Е. И., Антонов Б. В. Методика геохимических поисков золоторудных месторождений на площадях развития осыпей.— В кн.: Методика и техника геохимических поисков рудных месторождений. Фрунз, Илим, 1975, с. 42—44.
- Загоскин В. А., Загоскина Е. И., Королева Г. П. Гидрохимические поиски по склоновым водам в горно-таежной зоне.— В кн.: Гидрогеохимические методы исследований в целях поисков глубокозалегающих рудных месторождений (тезисы докладов Всесоюзного совещания). Томск, изд. Томск. политехн. ин-та, 1978, с. 95—96.
- Загоскин В. А., Шиманский А. А. Стрoение первичных ореолов рассеяния редкометалльных пегматитов натро-литиевого типа.— В кн.: Геохимия пегматитов Восточной Сибири. М., Недра, 1971, с. 195—205.
- Загоскина Е. И. Вторичные ореолы рассеяния Ленского золоторудного района. Автореф. канд. дис. Иркутск, 1977. 22 с.
- Загоскина Е. И., Загоскин В. А., Мясников А. А. Процессы образования вторичных ореолов рассеяния рудных месторождений на горных склонах таежных районов Иркутской области.— В кн.: Вторичные ореолы рассеяния и их использование при поисках рудных месторождений (на территории Сибири. Улан-Удэ, Бурят. кн. изд-во, 1973, с. 108—119.
- Зоубек В., Таусон Л. В., Козлов В. Д. Первые результаты геохимического и геотектонического сопоставления оловоносных гранитоидов Рудных Гор (Чехословакия) и Восточного Забайкалья (СССР).— Изв. АН СССР. Серия геол., 1973, № 5, с. 13—24.
- Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М., Недра, 1965. 228 с.
- Исследование и применение физико-химических процессов при поисках и разведке полезных ископаемых методом КСПК.— В кн.: Методика и техника разведки. Л., изд. ОНТИ, 1976, № 103, с. 12—19.
- Карасик М. А., Герасимова Л. И. Экспериментальные исследования по растворению и испарению киновари.— Минералог. сб. Львовск. гос. ун-та им. И. Франко, 1973, вып. 4, № 27, с. 319—325.
- Карасик М. А., Герасимова Л. И., Порошин Э. С. К теоретическим основам газорудного метода поисков рудных месторождений.— В кн.: Геохимические методы при поисках и разведке рудных месторождений. Вып. 5, М., изд. ИМГРЭ, 1971, с. 5—30.
- Карасик М. А., Порошин Э. С. О значении глубинных геофизических исследований для познания закономерностей размещения рудного оруденения.— В кн.: Геофизический сборник. Киев, Наукова думка, 1974, вып. 58, с. 82—89.
- Квашневская Н. В. Поиски рудных месторождений по потокам рассеяния.— В кн.: Геохимические поиски рудных месторождений в СССР. М., Госгеолтехиздат, 1957, с. 146—157.
- Классификация и номенклатура plutонических (интрузивных) горных пород. М., Недра, 1975. 25 с.
- Кобахадзе Л. П. Экономика геологоразведочных работ.— М., Недра, 1978. 295 с.

Коваленко В. И., Кузьмин М. И., Антипин В. С., Петров Л. Л. Топазсодержащий кварцевый кератофир (ангонит) — новая разновидность субвулканических жильных магматических пород.— Докл. АН СССР, 1971, т. 199, № 2, с. 430—433.

Коваленко В. И., Кузьмин М. И., Козлов В. Д., Владыкин Н. В. Метасоматические цвиттеры и связанное с ними редкометальное оруденение (на примере месторождений Монголии и Чехословакии).— В кн.: Метасоматизм и рудообразование. М., Наука, 1974, с. 42—53.

Козлов В. Д. К оценке степени концентрации редких элементов в дифференциатах гранитоидных интрузий по минералам-концентраторам.— Геохимия, 1969, № 3, с. 309—321.

Козлов В. Д. Геология и геохимия палеозойских гранитоидов Ундино-Газимурского района (Восточное Забайкалье).— В кн.: Геохимия редких элементов в магматических комплексах Восточной Сибири. М., Наука, 1972, с. 48—96.

Козлов В. Д. Геохимические особенности рудоносности и вопросы размещения гранитных интрузий в Центральном Забайкалье.— Изв. АН СССР. Серия геол., 1974, № 10, с. 58—69.

Козлов В. Д. Геохимические вопросы формирования и дифференциации рудопосных гранитных систем.— В кн.: Проблемы геохимии эндогенных процессов. Новосибирск, Наука, 1977, с. 40—51.

Козлов В. Д., Свядковская Л. Н. Геохимия и рудоносность гранитоидов Южно-Даурского свода (Центральное Забайкалье).— В кн.: Редкометальное оруденение гранитоидов Забайкалья. Чита, 1972, с. 58—75.

Козлов В. Д., Свядковская Л. Н. Петрохимия, геохимия и рудоносность гранитоидов Центрального Забайкалья. Новосибирск, Наука, 1977. 252 с.

Козлов В. Д., Шеремет Е. М., Яновский В. М. Петролого-геохимические различия и вопросы генезиса внегеосинклинальных мезозойских гранитоидов оловянно-вольфрамового и золото-молибденового поясов Забайкалья.— Изв. АН СССР. Серия геол., 1975, № 4, с. 45—64.

Красников В. И. Основы рациональной методики поисков рудных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1959. 412 с.

Крылова Л. Я. Формы нахождения йода в горных породах и их поисковое значение. Автореф. канд. дис. Л., 1971. 25 с.

Крылова Л. Я., Миллер А. Д., Шнейдер Л. А. Распределение йода в минералах.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, Наука, 1972, с. 336—344.

Кувтырева В. А., Соловарова Г. П. О применении геохимических методов поисков слюдоносных пегматитов по первичным ореолам рассеяния.— Разведка и охрана недр, 1966, № 12, с. 11—17.

Лавров А. П., Толкач В. В., Шаповал Л. И. Применение гидрогеохимических методов при прямых поисках месторождений нефти и газа (на примере Припятской впадины).— В кн.: Применение ландшафтно-геохимических методов исследований в Прибалтике и Белоруссии. Минск, Наука и техника, 1972, с. 73—82.

Ларионов Г. Ф., Самохвалова Т. М. Роль солевых ореолов рассеяния при геохимических поисках глубокозалегающего оруденения в условиях Центрального Казахстана (на примере Атасуйского района).— В кн.: Геохимические поиски рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке по вторичным ореолам рассеяния. Иркутск, 1973, с. 159—168.

Ларионов Г. Ф., Свешников Г. В. Сорбционно-солевой метод поисков глубокозалегающих рудных месторождений в Центральном Казахстане.— Вестник Ленинградского университета, 1977, № 12, с. 10—18.

Лапп М. А., Судов Б. А. О возможности использования ореолов рассеяния йода для поисков глубокозалегающих рудных тел.— В кн.: Геохимические поиски рудных месторождений на основе высокочувствительного определения галогенов. Л., изд. ВИТР, 1963, с. 3—11.

Лапп М. А., Судов Б. А. Поиски глубокозалегающих рудных тел и месторождений по ореолам элементов широкого рассеяния.— Советская геология, 1963, № 10, с. 113—119.

Лануть В. А. Геохимическая характеристика палеозойских отложений Припятской впадины. Минск, Наука и техника, 1970. 206 с.

Левинсон А. Введение в поисковую геохимию. М., Мир, 1976. 501 с.

Лейтес А. М., Миллер А. Д., Александров Л. Б. Содержание рения в архейских толщах алданского щита — возможный показатель условий осадконакопления в раннем докембрии.— Докл. АН СССР, 1977, т. 237, № 4, с. 947—950.

Литвиновский Б. А., Завилевич А. Н. К проблеме баргузинского и вятимканского интрузивных комплексов (Западное Забайкалье).— В кн.: Палеозойские магматические формации Саяно-Байкальской горной области. Улан-Удэ, 1972, с. 58—71.

Лопаткина А. П., Квашневская П. В., Комаров В. С., Андреев А. Г., Сергеев А. Н., Тафеев Г. П. Геохимическое изучение твердого и жидкого стока малых рек с целью междомасштабного прогнозирования.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, Наука, 1972, с. 279—285.

Лукашев В. К. Геохимические индикаторы процессов гипергенеза и осадкообразования. Минск, Наука и техника, 1972. 320 с.

Лукашев К. И., Кузнецов В. А., Лукашев В. К. Геохимическое изучение земной коры. Минск, Наука и техника, 1977. 176 с.

Лукашев В. К., Кузнецов В. А., Матрунчик Л. И. Литогеохимические фации кайнозоя запада Русской платформы. Минск, Наука и техника, 1974. 244 с.

Лукашев К. И., Лукашев В. К. Геохимические методы поисков элементов в зоне гипергенеза. Т. 1, 2. Минск, Наука и техника, 1967. 378 с.

Лукашев В. К., Лукашев К. И. Использование ионообменных смол при геохимических поисках.— Докл. АН БССР, 1978, т. 22, № 6, с. 544—546.

Лукашев К. И., Лукашев В. К., Матрунчик Л. И. Экспериментальные ландшафтно-геохимические поиски редкометалльных месторождений.— Докл. АН БССР, 1977, т. 21, № 2, с. 172—175.

Макагон В. М., Кузнецова Л. Г., Таусон Л. В. Экзоконтактные изменения и первичные ореолы около жил пегматитов с различной минерализацией в зональном пегматитовом поле.— В кн.: Ежегодник-1975 СибГЕОХИ. Иркутск, Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1976, с. 67—72.

Макагон В. М., Несмелов Г. Г., Полетаев И. А., Шмакин Б. М. Экзоконтактные изменения и геохимические аномалии вокруг пегматитовых жил с Ta—Cs—Li специализацией.— Докл. АН СССР, 1974, т. 219, № 6, с. 1468—1471.

Математическая обработка данных в поисковой геохимии. Новосибирск, Наука, 1976. 209 с.

Математические методы при прогнозе рудоносности. М., Наука, 1977. 248 с.

Методическое руководство по гидрогеохимическим поискам рудных месторождений. М., Недра, 1973. 182 с.

Миллер А. Д. Методы разделения составляющих рассеяния и определения элементов широкого рассеяния при геохимических поисках.— Бюл. научн.-техн. информ. Министерства геологии и охраны недр СССР, М., Госгеолтехиздат, 1962, № 10 (44), с. 103—109.

Миллер А. Д. Применение ускоренного частичного фазового анализа при геохимических поисках.— Бюл. научн.-техн. информ. Министерства геол. и охраны недр СССР, М., Госгеолтехиздат, 1962, № 1 (35), с. 106—108.

Миллер А. Д. Опыт определения рения в горных породах кинетическим методом. Лабораторные и технологические исследования и методы обогащения минерального сырья.— Экспресс-информация ВИЭМС, 1974, серия X, № 4, с. 1—12.

Миллер А. Д., Волков Б. И. Высокочувствительный кинетический метод определения рения в природных водах.— В кн.: Применение гидрогеохимического метода при поисках рудных месторождений. М., изд. ВСЕГИНГЕО, 1974, с. 103—110.

Миллер А. Д., Гросе Ю. И. Высокочувствительные кинетический и фотометрический методы определения рения в горных породах и побочных продуктах металлургического производства.— В кн.: Рений. Химия, технология, анализ. М., Наука, 1976, с. 170—173.

Миллер А. Д., Данилов В. Я. Солевые ореолы рассеяния редкометалльных пегматитов Кольского полуострова.— Геохимия, 1957, № 6, с. 529—537.

Миллер А. Д., Каравайкова А. П., Муликовская И. П. Концентрирование и определение ультрамикрочастиц золота в природных водах и кислотных вытяжках при поисковых работах.— В кн.: Обмен опытом. Вып. 41. Л., изд. ВИТР, 1961. 24 с.

Миллер А. Д., Либина Р. И. К вопросу об определении микроколичеств меди, свинца и цинка в природных водах и вытяжках из почв.— Журнал аналитической химии, 1958, вып. 13, № 6, с. 664—667.

Миллер А. Д., Либина Р. И., Данилов В. Я. Определение ниобия в природных водах и вытяжках из рыхлых отложений на месторождениях редкометалльных пегматитов.— В кн.: Опыт разработки гидрохимических методов поисков рудных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1959, с. 102—104.

Миллер А. Д., Логинова Л. Г., Александрова Л. Б., Арапова Р. М. Групповое концентрирование микроколичеств висмута, мышьяка, сурьмы, олова, молибдена, серебра, индия после разложения горных пород для последующего спектрального анализа.— В кн.: Тезисы докладов Второй Всесоюзной конференции по методам концентрирования в аналитической химии. М., Наука, 1977, с. 195—196.

Миллер А. Д., Степанов П. А. Спектральное определение микроэлементов в водах и вытяжках на основе соосаждения с сульфидом кадмия.— В кн.: Обмен опытом, № 17. Л., изд. ВИТР, 1959. 25 с.

Миллер А. Д., Степанов П. А. Соосаждение микрокомпонентов с сульфидом кадмия и спектральный анализ полученных концентратов.— В кн.: Методическое руководство по определению микрокомпонентов в природных водах при поисках рудных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1961, с. 225—235.

Миллер А. Д., Судов Б. А. Опыт применения слабощелочных вытяжек при металлотометрической съемке на территории развития моренно-ледниковых отложений в Эстонской ССР.— В кн.: Методика и техника разведки (геохимические поиски и методы анализа проб). Сборник № 43. Л., Л., изд. ВИТР, 1963, с. 51—53.

Миллер А. Д., Фишер Э. И. Высокочувствительный химико-спектральный метод определения золота в горных породах без применения царской водки.— В кн.: Методы анализа редкометалльных минералов, руд и горных пород. Вып. 3. М., изд. ИМГРЭ, 1973, с. 43—49.

Миллер А. Д., Шергина Ю. П., Комарова Э. В., Каминская А. Б., Каравайкова А. П. Количественное определение микросодержаний Cu, Ni и Co во вторичных ореолах рассеяния.— В кн.: Методические указания. Вып. 12. Л., изд. ВИТР, 1959, с. 8—24.

Миллер А. Д., Шнейдер Л. А. Определение микроколичеств йода в природных водах металлическим методом.— Журнал анал. химии, 1963, вып. 18, № 3, с. 371—376.

Миллер А. Д., Шнейдер Л. А., Вычужанина И. П., Крылова Л. Я. Методы определения общего содержания и подвижной фазы йода и брома в горных породах и природных водах для целей геохимических поисков. Л., изд. ВИТР, 1968. 55 с.

Миляев А. С., Шарков Ю. В. К вопросу об изучении ослабленных аномалий.— В кн.: Поиски урановых месторождений в условиях горной тайги. М., Атомиздат, 1971, с. 63—68.

Мицкевич Б. Ф. Опыт применения биогеохимического метода поисков на Украине.— Бюл. научн.-техн. информации, 1962, т. 35, № 1, с. 31—33.

Мицкевич Б. Ф. Геохимические методы поисков и условия их применения на Украине и в Молдавии. Киев, Наукова думка, 1965. 128 с.

Мицкевич Б. Ф. Геохимические ландшафты Украинского щита. Киев, Наукова думка, 1971. 176 с.

Мицкевич Б. Ф. Ландшафтно-геохимические исследования как метод повышения эффективности геохимических поисков на Украине.— Геологический журнал, 1976, т. 36, № 1, с. 63—71.

Мицкевич Б. Ф., Комський М. М., Курилик О. К. Досвід ландшафтно-геохімічних досліджень в Північно-західній частині Українського кристалічного щита.— Доповіді АН УРСР. 1966, № 7, с. 926—930.

Муликовская И. П. Анализ природных вод на сумму тяжелых металлов дитионовым методом.— В кн.: Обмен опытом. Вып. 3. Л., изд. ВИТР, 1957. 21 с.

Невский В. А., Сморгачев И. Е. О некоторых проблемах постмагматического рудообразования.— В кн.: Очерки по геологии и геохимии рудных месторождений. М., Наука, 1970, с. 8—17.

Нежданова И. К., Свешников Г. Б., Суетин Ю. П. Опыт применения сорбционно-солевого метода при поисках сульфидных медно-никелевых руд в районах Кольского полуострова и Карелии.— Вестник Ленингр. ун-та, 1974, № 18, с. 44—50.

Нефть Белоруссии (потенциальные и нефтегазоносные районы)/Лукашев К. И. и др.— Минск, Наука и техника, 1969. 203 с.

Овчинников Л. Н. Логико-методологические основы изучения процессов рудообразования.— В кн.: Современное состояние учения о месторождении полезных ископаемых. Ташкент, Фан, 1975, с. 488—494.

Овчинников Л. Н., Григорян С. В. Закономерности состава и строения первичных ореолов сульфидных месторождений.— В кн.: Научные основы геохимических методов поисков глубоко залегающих рудных месторождений. Ч. 1. Доклады. Иркутск, 1970, с. 3—36.

Овчинников Л. Н., Григорян С. В. Рациональная последовательность и сочетание геохимических методов при поисковых и разведочных работах.— В кн.: Геохимические поиски месторождений цветных металлов. Красноярск, 1977, с. 7—10.

Основные типы оловорудных районов/Лугов С. Ф. и др.— М., Недра, 1976. 232 с.

Перельман А. И. К вопросу о подвижности элементов в процессе выветривания и почвообразования.— В кн.: Сборник научных студенческих работ МГУ. Почвоведение. Вып. 8, М., Изд-во МГУ, 1940, с. 78—93.

Перельман А. И. Миграционная способность химических элементов в коре выветривания.— В кн.: Кора выветривания. № 2, М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 92—100.

Перельман А. И. Геохимия ландшафтов. М., Географиздат, 1961. 496 с.

Перельман А. И. Геохимия ландшафтов. М., Высшая школа, 1966. 392 с.

Перельман А. И. Геохимия эпигенетических процессов. М., Недра, 1968. 328 с.

Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М., Недра, 1972. 287 с.

Перельман А. И. Детальные ландшафтно-геохимические исследования и поиски рудных месторождений.— В кн.: Вторичные ореолы рассеяния и их использование при поисках рудных месторождений на территории Сибири. Улан-Удэ, 1973, с. 128—147.

Перельман А. И. Геохимия ландшафта. Высшая школа, 1975. 351 с.

Перельман А. И., Шарков Ю. В. Опыт выделения на территории СССР провинций и районов с различными условиями проведения геохимических поисков.— В кн.: Геохимические поиски рудных месторождений в СССР. М., Госгеолтехиздат, 1957, с. 104—107.

Побоква О. П. Гипергенные ореолы рассеяния свинцово-цинковых месторождений Садоно-Уналейского рудного поля.— Автореф. канд. дис. М., 1969. 33 с.

Покровский С. Д., Ракитский Б. Н. Геохимические поиски по гипергенным ореолам рассеяния.— Разведка и охрана недр, 1971, № 10, с. 21—26.

Поликарпочкин В. В. Распределение концентраций рудных элементов на склонах при самопроизвольном движении рыхлых масс и действия склоновых водных

- потоков.— В кн.: Математические методы геохимических исследований. М., Наука 1966, с. 119—150.
- Поликарпочкин В. В.** Применение биогеохимических методов поисков рудных месторождений в условиях Сибири.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, 1969, с. 9—22.
- Поликарпочкин В. В.** Взаимосвязь типов золотоносной минерализации Ленского района и ее зональность.— В кн.: Ежегодник-1971 СибГЕОХИ, Новосибирск, 1972, с. 283—288.
- Поликарпочкин В. В.** Теория вторичных механических ореолов рассеяния и их генетическая классификация.— В кн.: Вторичные ореолы рассеяния и их использование при поисках рудных месторождений на территории Сибири. Улан-Удэ, Бурят. кн. изд-во, 1973, с. 60—80.
- Поликарпочкин В. В.** Вторичные ореолы и потоки рассеяния. Новосибирск, Наука, 1976. 407 с.
- Поликарпочкин В. В.** Стратегия геохимических поисков рудных месторождений.— В кн.: Стратегия геохимических поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1980.
- Поликарпочкин В. В., Касьянова И. В., Утгоф А. А., Чербянова Л. Ф.** Геохимические поиски месторождений полиметаллов в Восточном Забайкалье по илам гидросети и водам.— В кн.: Новое в методике и технике геологоразведочных работ. Сб. 1. Л., Госгостехиздат, 1958, с. 46—73.
- Поликарпочкин В. В., Филиппова Л. А., Евдокимова В. Н.** Потэки рассеяния Хапчераггинского рудного района (Забайкалье).— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск, Наука, 1978, с. 64—82.
- Поликарпочкин В. В., Шергин Б. В., Белоголова Г. А.** Закономерности пространственного размещения золоторудных проявлений в черных сланцах по данным геохимической съемки по потокам рассеяния.— В кн.: Геохимические методы поисков. Методы анализа. Иркутск, изд. Института геохимии СО АН СССР, 1977, с. 15—18.
- Пресняков Е. А.** Об асимметрии долин в Сибири.— В кн.: Вопросы геологии Азии. Т. II. М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 391—396.
- Размахнин Ю. Н.** Основные черты геохимии метасоматитов оловоносных полей Сихотэ-Алиня и их металлогеническое значение.— Геохимия. 1973, № 4, с. 570—577.
- Рассказов Н. М.** Экспериментальное изучение процессов электрохимического растворения смесей арсенидов и сульфидов.— Вестник ЛГУ, серия геол. и геогр., 1963, вып. 2, № 12, с. 57—61.
- Роль технического прогресса в повышении эффективности производства геологоразведочных работ/Корнилов Н. И. и др. М., Недра, 1973. 150 с.**
- Романова М. М.** История представлений о происхождении гранитов. М., Наука, 1977. 188 с.
- Руб М. Г., Тронева Н. В.** Аксессуары минералы как индикаторы рудоносности гранитоидов.— В кн.: Магматизм и рудообразование. М., Наука, 1974, с. 62—79.
- Рябчиков И. Д.** Термодинамический анализ поведения малых элементов при кристаллизации силикатных расплавов. М., Наука, 1965. 120 с.
- Рябчиков И. Д.** Закономерности распределения микрокомпонентов между фазами природных систем.— В кн.: Геохимия, М., Наука, 1972. с. 96—103.
- Сает Ю. Е.** Геохимические методы поисков сульфидных месторождений, перекрытых оловянно-касситеритовыми отложениями, по эпигенетическим ореолам рассеяния.— В кн.: Геохимия, минералогия, петрология. МГК, XXV сессия. Доклады советских геологов. М., Наука, 1976, с. 62—77.
- Сафронов Н. И.** О некоторых результатах опытных работ по спектральному анализу оловянно-касситеритовых проб.— Разведка недр, 1935, № 14, с. 32—33.
- Сафронов Н. И.** Проблема комплексной разведки сульфидных месторождений.— В кн.: Материалы ЦНИГРИ. Сб. 1. Л., 1936, с. 66—74.
- Сафронов Н. И.** К вопросу об «ореолах рассеяния» месторождений полезных ископаемых и их использование при поисках и разведке.— Проблемы советской геологии, 1936, т. VI, № 4, с. 303—323.
- Сафронов Н. И.** Способ восстановления железа из пирротинов. Авт. свид. № 63625, кл. 40-с, опубл. 30 апреля 1944 г., заявл. 22 сентября 1939 г.
- Сафронов Н. И.** Комплексный химико-адсорбционный спектральный анализ рудных проб на золото.— В кн.: Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока. Магадан, кн. изд-во, 1955, вып. 9, с. 139—150.
- Сафронов Н. И.** К вопросу о возможностях геохимических поисков в условиях моренных отложений.— В кн.: Геохимические поиски рудных месторождений в СССР. М., Госгеолтехиздат, 1957, с. 107—115.
- Сафронов Н. И.** Формы рассеянного состояния элементов в природе и их поисковое значение.— В кн.: Труды I Всес. совещания по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1957, с. 52—61.
- Сафронов Н. И.** Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Ч. II. Л., изд. ВИТР, 1963, с. 5, 36, 73—75.

Сафронов Н. И. Основные термодинамические закономерности при изучении энергии рудообразования.— Записки Ленингр. горного ин-та, 1966, вып. 2, № 50, с. 17—31.

Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., изд. ВИТР, 1967. 203 с.

Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., Недра, 1971. 216 с.

Сафронов Н. И. Поисково-разведочные задачи на современном этапе и пути развития геохимических методов поисков.— В кн.: Вторичные ореолы рассеяния и их использование при поисках рудных месторождений на территории Сибири. Улан-Удэ, изд. Сиб. секции СГНМ СибГЕОХИ ГИН ВФ СО АН СССР. 1973, с. 5—12.

Сафронов Н. И., Мещеряков С. С., Иванов Н. П. Энергия рудообразования и поисков полезных ископаемых. Л., Недра, 1977. 216 с.

Сафронов Н. И., Поликарпочкин В. В., Утгоф А. А. Спектро-золотометрическая съемка как метод поисков золоторудных месторождений, не сопровождающихся механическими ореолами (россыпями).— В кн.: Обмен опытом. Вып. 1. Л., изд. ОНТИ ВИТР, 1957, с. 1—10.

Сафронов Н. И., Радионов П. Ф. К вопросу о современном состоянии электрометрических методов прикладной геофизики и их задачи в области цветных металлов.— Проблемы сов. геологии. Т. 2, № 4, 1933, с. 62—76.

Сафронов Н. И., Соловов А. П. Применение спектрального анализа при поисках и разведке оловорудных месторождений.— Разведка недр, 1935, № 24, с. 24—27.

Сафронов Н. И., Соловов А. П. Проблемы спектроанализа в разведочном деле. Результаты применения спектроанализа при поисках оловорудных жил.— Проблемы советской геологии, 1936, № 8, с. 736—740.

Сафронов Н. И., Соловов А. П., Сергеев Е. А. Новые методы поисков полезных ископаемых, основанные на изучении ореолов рассеяния.— Разведка недр, 1936, № 18, с. 24—25.

Свадковская Л. Н. Петролого-геохимическое расчленение верхнеюрских гранитоидных интрузий юга Центрального Забайкалья и вопросы их рудоносности.— Геология и геофизика, 1974, № 4, с. 61—70.

Свешников Г. Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л., изд. Ленингр. ун-та, 1967. 160 с.

Свешников Г. Б., Ильин Ю. Т., Ларионов Г. Ф., Тененбаум Л. Я., Штерн Н. Л. Методика комплексных геофизических и геохимических работ при поисках рудных месторождений Атаусуйского типа.— Ученые записки Ленингр. ун-та, 1971, № 361 (Вопросы геофизики, вып. 21), с. 107—119.

Свешников Г. Б., Ларионов Г. Ф., Виноградов Б. П., Самохвалова Т. М., Тененбаум Л. Я. К теоретическим и методическим основам сорбционно-солевого метода поисков сульфидных месторождений.— Вестник Ленингр. ун-та, 1972, № 12.

Свешников Г. Б., Нежданова И. К., Суетин Ю. П. Применение гидрогеохимического метода при поисках сульфидных медно-никелевых руд в масштабах 1 : 50000—1 : 25000 в Карело-Кольском регионе.— Ученые записки Ленингр. ун-та, 1977, № 391. (Вопросы геофизики, вып. 26), с. 90—95.

Свешников Г. Б., Туркин Ю. И., Виноградов Б. П., Свистов П. Ф. Атмохимический метод и его применение при поисках рудных месторождений.— Вестник Ленингр. ун-та, 1975, № 24, с. 80—83.

Свешников Г. Б., Туркин Ю. И., Свистов П. Ф., Виноградов Б. П., Козлов Л. П., Богословский С. Н. Способ поисков месторождений полезных ископаемых. Авт. свид. № 457956, 1974.

Сегалевич С. Ф. Состав и строение ореола Шерловогорской гранитной интрузии.— В кн.: Ежегодник-1974 СибГЕОХИ. Новосибирск, Наука, 1976, с. 179—183.

Сейсмичность в районе водохранилища.— Природа, 1978, № 10, с. 193.

Семенов А. С. Экспериментальные исследования по определению размеров и элементов залегания пластовых тел методом заряда.— В кн.: Вопросы разведочной геофизики. Вып. 1. Л., Гостехиздат, 1962, с. 117—144.

Сергеев Е. А. Исследование вод как средство поисков полиметаллических месторождений.— Разведка недр, 1946, № 2, с. 51—55.

Серегин С. И. Резко ослабленные вторичные ореолы рассеяния рудных элементов как поисковый признак месторождений в карбонатных породах в условиях влажного климата.— В кн.: Поиски урановых месторождений в условиях горной тайги. М., Атомиздат, 1971, с. 56—63.

Смирнов В. И. Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. М., Изд-во МГУ, 1954. 546 с.

Смирнов С. С. Зона окисления сульфидных месторождений. М.—Л., изд. ОНТИ, 1936, 336 с.

Смирнов С. С. Очерк металлогении Восточного Забайкалья. М.—Л., Госгеолтехиздат, 1944. 91 с.

Соловов А. П. Основы теории и практики металлотрических съемок. Алмата, ГИН АН КазССР, 1959. 258 с.

Соловов А. П., Кунин Н. Я. Металлотрическая съемка по потокам рассеяния в горных районах.— Советская геология, 1960, № 5, с. 32—46.

Страгис Ю. М. Эндогенный ореол эксплозивных брекчиевых рудных тел Сорского месторождения и его использование для оценки глубоких горизонтов.— В кн.: Ежегодник-1974, СибГЕОХИ. Новосибирск, Наука, 1976, с. 248—251.

Суцник Ю. Я. Геохимия зоны гипергенеза Украинских Карпат. Киев, Наукова думка, 1978. 242 с.

Тайсаев Т. Т. Ландшафтно-геохимические основы районирования территории Бурятии по условиям ведения геохимических поисков.— В кн.: Вторичные ореолы рассеяния и их использование при поисках рудных месторождений на территории Сибири. Улан-Удэ, 1973, с. 185—203.

Тайсаев Т. Т. Способ геохимических поисков рудных месторождений. Авт. свид. № 409181, 1974.

Тайсаев Т. Т. Сульфидионные механические ореолы на курумных склонах.— В кн.: Геохимические поиски месторождений цветных металлов. Красноярск, 1977, с. 84—86.

Тайсаев Т. Т. Применение торфгеохимического метода при поисках колчеданно-полиметаллических и молибденовых месторождений в Бурятии.— В кн.: Геохимические поиски месторождений цветных металлов. Красноярск, 1977, с. 131—135.

Татарский Б. В. Распределение редких щелочных элементов в околосильных ореолах слюдоносных пегматитов Чулино-Лоухского района.— В кн.: Минералогия и геохимия. Вып. 5. Изд. ЛГУ, 1975, с. 92—98.

Таусон Л. В. Геохимия редких элементов в гранитоидах. М., Изд-во АН СССР, 1961. 232 с.

Таусон Л. В. Геохимия редких элементов в изверженных горных породах и металлогеническая спелицизация магм.— В кн.: Химия земной коры. Т. II. М., Наука, 1964, с. 229—239.

Таусон Л. В. Факторы геохимической истории редких элементов в гранитном магматическом процессе.— Геохимия, 1967, № 11, с. 1310—1319.

Таусон Л. В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М., Наука, 1977. 279 с.

Таусон Л. В., Анфилогов В. П., Коваленко В. И., Козлов В. Д., Кузьмин М. И., Трошин Ю. П. Факторы потенциальной рудоносности гипабиссальных интрузий гранитоидов.— В кн.: Геохимические критерии потенциальной рудоносности гранитоидов. Вып. 1. Иркутск, 1970, с. 216—261.

Таусон Л. В., Дубов Р. И., Козлов В. Д., Кузьмин М. И. Геохимическое значение дисперсии концентраций редких элементов в гранитоидах.— В кн.: Вопросы геохимии изверженных горных пород и рудных месторождений Восточной Сибири. М., Наука, 1965, с. 12—22.

Таусон Л. В., Козлов В. Д., Кузьмин М. И. Геохимические критерии потенциальной рудоносности гранитоидных интрузий.— В кн.: Проблемы геохимии и космологии. МГК, XXIII сессия. Доклады советских геологов. М., Наука, 1968, с. 166—172.

Таусон Л. В., Петровская С. Г., Санин Б. П. Эндогенные ореолы рассеяния молибдена, меди, свинца и цинка в Шахтаминском рудном поле (Вост. Забайкалье).— В кн.: Ореолы рассеяния месторождений Восточной Сибири. М., Наука, 1971, с. 5—18.

Таусон Л. В., Цамбел Б., Козлов В. Д., Каменички Л., Губач И. Особенности распределения редких элементов в куполах гемеридных графитов (Зап. Карпаты, ЧССР).— В кн.: Ежегодник-1974, СибГЕОХИ. Новосибирск, Наука, 1976, с. 45—49.

Трифопова Н. А., Удодов П. А., Васильев Н. В., Коробейникова Е. С. Поровые растворы горных пород — среда обитания микроорганизмов.— В кн.: Материалы V съезда Всес. минер. о-ва АН СССР. Ереван, 1975, с. 136—140.

Удодов П. А., Онуфриенок И. П., Парилов Ю. С. Опыт гидрогеохимических исследований в Сибири. М., Высшая школа, 1962. 187 с.

Удодов П. А., Шамолин В. А., Коробейникова Е. С. Геологическая деятельность микроорганизмов в поровых растворах горных пород.— В кн.: Материалы к науч.-метод. конференции. Новокузнецк, 1970, с. 42—45.

Ферман А. Е. Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых. М., Изд-во АН СССР, 1940. 466 с.

Ферман А. Е. Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых.— В кн.: Избранные труды, т. II. М., Изд-во АН СССР, 1953, с. 443—752.

Ферман А. Е. Геохимия, т. 2, М., 1953, 768 с.

Филиппова Л. А. Потoki рассеяния в речной мути и использование их при поисковых работах.— В кн.: Ежегодник-1973, СибГЕОХИ. Новосибирск, Наука, 1974, с. 267—270.

Филиппова Л. А. Потoki рассеяния рудных месторождений Ханчерагинского района (Восточное Забайкалье). Автореф. канд. дис. Иркутск, 1978. 17 с.

Фишер Э. И. Растворение золота в различных окислительно-восстановительных условиях в связи с вопросами прикладной геохимии и методами анализа горных пород. Автореф. канд. дис. Рига, 1974. 24 с.

Фишер Э. И., Фишер В. Л., Миллер А. Д. Экспериментальные исследования характера взаимодействия природных органических кислот с золотом.— Советская геология, 1974, № 7, с. 142—146.

- Фурсов В. З.** Газортутный метод поисков рудных месторождений. М., изд. ИМГРЭ, 1976. 190 с.
- Фурсов В. З.** Поиски рудных месторождений по газовым ореолам рассеяния ртути.— Советская геология, 1977, № 4, с. 55—65.
- Фурсов В. З.** Ртуть — индикатор при геохимических поисках рудных месторождений. М., Недра, 1977, 144 с.
- Хокс Х. Е., Уэбб Дж. С.** Геохимические методы поисков минеральных месторождений. М., Мир, 1964. 488 с.
- Хрущев Н. А.** Развитие добычи полезных ископаемых в капиталистических странах.— В кн.: Принципы прогнозной оценки месторождений полезных ископаемых. Т. 1. М., Недра, 1977, с. 9—17.
- Читаева Н. А., Миллер А. Д., Гроссе Ю. И., Чистякова Н. И.** Особенности распределения йода в зоне гипергенеза Гайского медноколчеданного месторождения.— Геохимия, 1971, № 6, с. 696—709.
- Шарков Ю. В., Милаев А. С.** Методические основы крупномасштабного районирования Сибири по условиям ведения геохимических поисков рудных месторождений.— В кн.: Вторичные ореолы рассеяния и их использование при поисках рудных месторождений на территории Сибири. Улан-Удэ, 1973, с. 147—167.
- Шахова Е. Г.** Применение лито-, флоро- и торфометрии при поисках месторождений редкометалльных гранитных пегматитов натро-литиевого типа.— Труды ВИТР, 1958, вып. 10, с. 5—25.
- Шварцев С. Л.** Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., Недра, 1978. 230 с.
- Шварцева Н. М.** Сурьма в подземных водах Кадамджайского месторождения. Докл. АН СССР, 1972, т. 207, № 5, с. 1220—1222.
- Шмакин Б. М.** Мусковитовые и редкометалльно-мусковитовые пегматиты. Новосибирск, Наука, 1976. 368 с.
- Шмакин Б. М., Макрыгина В. А.** Геохимические особенности мусковитовых пегматитов и их контактовых ореолов. М., Наука, 1969. 264 с.
- Шнейдер Л. А.** Методы определения ультрамикрочисел йода в горных породах и природных водах в применении к поискам полезных ископаемых. Автореф. канд. дис. Л., изд. ЛГУ, 1966. 22 с.
- Шнейдер Л. А., Миллер А. Д.** Определение микрочисел йода в силикатных горных породах кинетическим методом.— Журнал анал. химии, 1965, т. 20, № 1, с. 92—97.
- Щербаков А. В.** Геохимия термальных вод. М., Наука, 1968. 234 с.
- Щербин С. С., Осетров О. А.** Первичные ореолы рассеяния редких элементов пегматитов как критерий поисков скрытого оруденения.— Геол. рудн. месторождений, 1961, т. III, № 6, с. 79—90.
- Эдельман А. М.** Опыт проведения газортутных исследований в Донбассе.— Геологический журнал, 1974, т. 31, № 1, с. 82—91.
- Экспериментальные исследования форм и процессов гипергенной миграции элементов/Лукашев К. И. и др.**— Минск, Наука и техника, 1977. 178 с.
- Arendt I. W., Butz T. R., Cagle G. W., Kane V. E., Nichols C. E.** A new approach for geochemical surveys of large areas for uranium resource potential.— In: Nuclear Power and Fuel Cycle. Proceeding of International Conference (Salzburg); 1977, v. 2, p. 285—300.
- Armour-Brown A., Nichol J.** Regional geochemical reconnaissance and the location of metallogenic provinces.— Econ. Geol., 1970, v. 64, N 3, p. 312—330.
- Barringer A. R.** Remote sensing techniques for mineral discovery.— In: Ninth Commonwealth Mining and Metallurgical Congress, 1969, Paper 20. 42 p.
- Derry D. R.** Exploration expenditure, discovery rate and methods.— Bull. Can. Inst. Min. Metall., 1970, N (695), p. 362—366.
- Garrett R. G., Nichol J.** Regional geochemical reconnaissance in Eastern Sierra Leone.— Trans. Mining and Metallurgy, 1967, sec. 13, v. 76, p. 97—112.
- Geoffroy J. D., Wignall T. K.** A probabilistic appraisal of mineral resources in a portion of the Grenville Province of the Canadian Shield.— Econ. Geol., 1971, v. 66, N 3, p. 446—479.
- Govett G. I. S.** World mineral supplies — the role of exploration geochemistry.— Journ. of Geochemical Exploration, 1977, v. 8, N 1/2, p. 3—16.
- Groves D.** The geochemical evolution of the tin-bearing granites in the Blue-Tier batholith, Tasmania.— Econ. Geol., 1972, v. 67, N 4, p. 445—457.
- Hall A.** Greisenisation in the granite of Gligga Head, Cornwall.— Proc. of the Geol. Assoc., 1971, v. 82, N 2, p. 209—230.
- Hall A.** Geochimie des granites varigues du Sud-Quest de l'Angleterre.— Bull. de la Soc. Geol. France, 1973, t. 15, N 3—4, p. 229—238.
- Hosking K. F. G., Pisarski J. B.** Geochemical surveys in Cornwall.— Mining. Mag., 1965, v. 112, N 3, p. 179—181.
- Hosking K. F. G.** Problems associated with the application of geochemical methods of exploration in Cornwall, England.— Geochemical Exploration. Special, 1974, v. 11, p. 176—189.
- Kendall M. G.** The Advanced Theory of Statistics. V. 3. 2nd edition, Ch. Griffin Co., Lmt. London 1968. 320 p.

- Klominsky J., Absolonova E.** Geochemistry of the Karlovy Vary granite massif (Czechoslovakia).— In: Metallization Associated with Acid Magmatism. V. 1. Praga, 1974, p. 189—196.
- Lange H., Tischendorf G., Pälchen W., Klemm J., Osenkopf W.** Fortschritte der Metallogenie im Erzgebirge. B. Zur Petrographie und Geochemie der Granite des Erzgebirges. — Geologie, 1972, Jrg. 21, Hr 4/5, S. 457—493.
- Levinson A. A.** Introduction to exploration geochemistry. Applied Publ. Co., Calgary, 1974. 612 p.
- Nickel E. H., Thornber M. R.** Chemical constraints on the weathering of serpentinites containing nickel — non sulfides.— Journ. of Geochemical Exploration, 1977, v. 7, N 1/2, p. 235—245.
- Shmakin B. M.** Geochemical indicators for the evaluation of granite pegmatites.— In: Abstr. 7-th Internat. Geochem. Explor. Symposium. Golden, 1978, p. 68—69.
- Shmakin B. M., Makryghina V. A., Glebov M. P., Zagorsky V. Ye.** Use of petrographical-geochemical prospecting method for the discovery of hidden muscovite deposits in different geological environment.— In: Geochemical Exploration, Special Volume 11, 1971, p. 391—393.
- Strubel I.** Hydrothermale Zonengen. Experimentelle Untersuchungsergebnisse über hydrothermal synthetische Lösungen bis 600°C und 2000 bar.— Geol. Rundschau, 1968, Bd 68, N 1, S. 259—273.
- Thornber M. R.** Pyrrhotite — the matrix of nickel sulphide mineralization.— Conf. Austr. Inst. Min. Metall. Newcastle, 1972, p. 51—58.
- Turekian K. K., Wedepohl K. H.** Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust.— Bull. Geol. Soc. America, 1961, v. 72, N 2, p. 175—192.
- Krige D. G.** statistical approach to some basis mine valuation problems on the Witwaters Rand.— Journal of the Chemical metallurgical and mining Society of South Africa, 1951, v. 52, N 6, p. 119—139.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
<i>Н. И. Сафронов.</i> К вопросу об «ореолах рассеяния» месторождений полезных ископаемых и их использовании при поисках и разведке *	4
<i>Н. И. Сафронов.</i> К вопросу о закономерности соотношений «запасы — содержание» в рудах	21
<i>Л. В. Таусон.</i> Магматогенные геохимические поля рассеяния и концентрирования	30
<i>С. В. Григорян, Л. П. Овчинников.</i> О поисковом и генетическом значении первичных ореолов рудных месторождений	37
<i>В. В. Поликарпочкин.</i> Геохимическое изучение больших территорий при поисковых работах	44
<i>А. И. Перельман.</i> Энергия и интенсивность рудообразования	51
<i>Е. М. Квятковский, Г. Ф. Новиков, В. А. Арцубашев.</i> Классификация, современное состояние и перспективы развития геохимических методов поисков рудных месторождений	54
<i>А. Н. Еремеев, А. С. Клочков.</i> Принципы и основные положения методики оценки глубинных геохимических аномалий	60
<i>А. Д. Миллер.</i> Влияние идей Н. И. Сафронова на развитие некоторых направлений анализа природных объектов	66
<i>Н. П. Сочеванов, С. В. Григорян, А. А. Головин.</i> Поисковое значение геохимических ассоциаций элементов в первичных ореолах	69
Б. П. Санин. Интерпретация геохимических аномалий путем совместного применения методов многомерных полей и кластер-анализа	75
<i>Р. И. Дубов.</i> Пространственно-статистические модели геохимических полей	80
<i>Б. М. Шмакин.</i> Геохимические методы поисков и оценки пегматитовых месторождений	91
<i>В. Д. Козлов.</i> Оценка рудоносности гранитоидных массивов	97
<i>В. А. Загоскин.</i> Применение геохимических методов поисков в горно-таежной зоне	112
<i>Л. А. Филиппова.</i> Поиски по потокам рассеяния в районах с развитой горно-промышленной деятельностью	120
<i>С. Л. Шварцев, П. А. Удодов, Н. М. Рассказов.</i> Вопросы формирования водных потоков рассеяния рудных месторождений	135
<i>Г. Б. Свешников.</i> О поисках глубокозалегающих рудных месторождений по солевому, водным и газовым ореолам	141
<i>В. С. Комаров, А. П. Лопаткина, А. Г. Андреев, А. Н. Сергеев, О. Д. Войко, В. А. Вьюшин.</i> Региональные гидрогеохимические поиски по речной сети	146
<i>Т. Т. Тайсаев.</i> Ландшафтно-геохимические условия и поиски рудных месторождений в Джидинском районе Забайкалья	154
<i>В. А. Глухов.</i> Состояние применения и геолого-экономическая эффективность геохимических методов поисков в СССР	160
<i>Э. Ф. Жбанов, А. С. Филько, В. А. Лбов, П. Ч. Шобогоров.</i> Проблема совершенствования геохимических поисков в Западном Забайкалье	172
<i>В. К. Лукашев, К. И. Лукашев.</i> Использование и эффективность геохимических методов поисков в Белоруссии	179
<i>Б. Ф. Мицкевич.</i> Условия применения геохимических методов поисков на Украине	188
Литература	192

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ
РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Часть 1

Утверждено к печати Институтом геохимии
им. академика А. П. Виноградова СО АН СССР

Ответственный редактор
Валентин Валентинович Поликарпочкин

Редактор издательства *З. Д. Роскина*
Художественный редактор *М. Ф. Глазырина*
Технический редактор *Г. Я. Герасимчук*
Корректоры *Е. Н. Зимица, В. А. Князева*

ИБ № 10788

Сдано в набор 05.05.80. Подписано к печати 26.02.81. МН-05219. Формат 70 × 108¹/₁₆. Бумага
типографская №2. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 18,2. Усл. кр.-отт.
18,55. Уч.-изд. л. 19.3. Тираж 1500 экз. Заказ 150. Цена 3 р. 10 к.

Издательство «Наука». Сибирское отделение. 630099, Новосибирск, 99, Советская, 18.
4-я типография издательства «Наука», 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.

УДК 550.42 + 550.844

К вопросу об «ореолах рассеяния» месторождений полезных ископаемых и их использовании при поисках и разведке. Сафронов Н. И. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Изложены основные вопросы теории образования ореолов рассеяния. Предлагаемая статья была написана более 40 лет назад, но затронутые в ней вопросы не потеряли большого научного и практического значения и в настоящее время.

Поставленные задачи по геохимическим методам поисков реализованы в последние годы благодаря внедрению высокочувствительной аналитической аппаратуры, возможности обработки геохимических анализов на ЭВМ и машинному построению геохимических карт. Ил. 9, табл. 5.

УДК 550.84

К вопросу о закономерности соотношений «запасы — содержание» в рудах. Сафронов Н. И. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Излагаются новые идеи о возможности использования геохимических кларков концентраций рудных элементов для расчета энергии рудообразования и прогнозных запасов руды. Приводятся соответствующие формулы и практические примеры. Ил. 2.

УДК 550.84.092

Магматогенные геохимические поля рассеяния и концентрирования. Таусон Л. В. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Показано резкое преобладание геохимических полей рассеяния, систематика которых основывается на принципах геохимической типизации геохимических тел.

Среди эндогенных геохимических полей концентрирования выделяются магматогенные, интрателлурические и гидротермально-метаморфогенные. Дается классификация магматогенных геохимических полей концентрирования, основанная на принципе стадийности, процессов дегазации продуктивных интрузий. Выделяются и характеризуются поля концентрирования магматических, пневматолитовых и гидротермального этапов.

УДК 550.42 + 550.85

О поисковом и генетическом значении первичных ореолов рудных месторождений. Григорян С. В., Овчинников Л. Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Приводятся примеры использования первичных ореолов рассеяния для поисков и оценки рудных месторождений по основным и сопутствующим элементам. Привлекается внимание специалистов к первичным ореолам как к источнику ценной генетической информации, позволяющей судить об источнике рудного вещества и механизме формирования месторождений. Ил. 5.

УДК 550.4 + 550.84

Геохимическое изучение больших территорий при поисковых работах. Поликарпочкин В. В. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Вследствие несовершенства геологических критериев необходимо сплошное покрытие территорий геохимическими съемками. Наиболее подходящим для этой цели способом является съемка по потокам рассеяния, допускающая опробование с малой плотностью. Вследствие повышенной глубинности съемка по потокам может быть применена не только в горно-складчатых районах, но и на равнинных платформенных территориях с покровом пострудных отложений. Геохимическая съемка больших территорий может проводиться при плотности опробования от 5—10 до 30—50 км² на одну пробу. На этой основе выделяются рудные районы, в которых сосредоточиваются дальнейшие поисковые работы. Большое значение имеет выяснение закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых по данным геохимических съемок больших территорий. На тех площадях, где геохимические съемки проведены ранее, для составления сводных геохимических карт может быть использована выборка из прежних данных.

УДК 550.87

Энергия и интенсивность рудообразования. Перельман А. И. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Энергия рудообразования данного элемента, определенная по формуле Н. И. Сафронова, равна произведению кларка концентрации элемента в рудах на интенсивность и время рудообразования. Этот вывод также может быть распространен на процессы ореолообразования, выветривания. Приведены примерные расчеты интенсивности рудообразования для отдельных металлов.

УДК 550.84

Классификация, современное состояние и перспективы развития геохимических методов поисков рудных месторождений. Квятковский Е. М., Новиков Г. Ф., Арцыбашев В. А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

В основу классификации положен принцип выявления месторождений по их ореолам в различных средах (лигто-, гидро-, атмо- и био-) в земном, водном и воздушном пространствах.

Рассмотрены типы геохимических съемок различных масштабов и способы опробования, применяемые при геохимических поисках различными методами. Показаны место и роль ядерно-физического, радиометрического, электрохимического и других способов опробования в комплексе геохимических методов при поисках, разведке и эксплуатации рудных месторождений. Ил. 3.

Принципы и основные положения методики оценки глубинных геохимических аномалий. Еремеев А. Н., Ключков А. С. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Излагаются основные принципы выбора методики глубинных геохимических поисков. Приводится рациональная последовательность и методика оценки геохимических аномалий. Обсуждается генетическая природа выявляемых глубинных аномалий и дается их классификация. Ил. 1.

Влияние идей Н. И. Сафронова на развитие некоторых направлений анализа природных объектов. Миллер А. Д. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Идеи Н. И. Сафронова оказали большое влияние на развитие аналитических методов, обслуживающих прикладную геохимию. Применение многокомпонентного, чувствительного и экспрессного метода — спектрального анализа — было предложено и начато Н. И. Сафроновым и получило широкое распространение в поисковой геохимии как основной аналитический метод.

Для осуществления идей Н. И. Сафронова был предложен и применяется ряд методов, в том числе по выделению компонентов вторично-наложенного рассеяния, концентрирования микроэлементов с последующим спектральным определением ряда элементов-индикаторов и, параллельно, экспрессным определением 1—3 типоморфных микроэлементов на базе полевой партии. Показавшее Н. И. Сафроновым большое значение элементов «широкого рассеяния» (в частности, йода и брома) инициировало разработку и применение ряда соответствующих высокочувствительных методов, в том числе кинетических, применительно к многокомпонентным системам. Появление таких методов для определения йода, серебра вызвало ряд геолого-геохимических исследований, имеющих теоретическое и практическое значение.

Приведен ряд примеров разработки методов и их применения.

Поисковое значение геохимических ассоциаций элементов в первичных ореолах. Сочеванов Н. Н., Григорян С. В., Головин А. А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

На примере Золотушинского полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) рассматриваются возможности корреляционного анализа при сопоставлении содержаний элементов, входящих в состав ореолов.

Рассмотрено несколько приемов обработки данных анализа корреляционных связей между элементами с учетом их положения в ряду геохимической зональности и путем составления структурных схем корреляционных связей. Этот прием позволяет объективно выделить геохимические ассоциации элементов, узловые элементы, корреляционные связи которых соединяют отдельные ассоциации, а также так называемые геохимические пепочки.

Приводятся критерии оценки геохимических аномалий с использованием данных о геохимических ассоциациях. Ил. 4, табл. 2.

Интерпретация геохимических аномалий путем совместного применения методов многомерных полей кластер-анализа. Санин Б. П. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Рассмотрено рациональное сочетание методов обработки геохимических данных на ЭВМ для повышения эффективности интерпретации комплексных аномалий. Показано, что повышение эффективности интерпретации таких аномалий зависит от правильного комбинирования методов многомерной статистики (многомерных полей и кластер-анализа). Ил. 4, табл. 2.

Пространственно-статистические модели геохимических полей. Дубов Р. И. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Обобщается опыт применения основных методов моделирования геохимических полей, где используются статистические данные, полученные при изучении различных природных объектов. Делается вывод о необходимости широкого применения регрессионного анализа, особенно при геохимических поисках глубокозалегающих месторождений. Указывается, что распространенные методы регрессии относительно малоприменимы из-за нерешенности вопросов выбора оптимальных формул и технических трудностей. Описывается решение этих вопросов с помощью специальной методики ранговой аппроксимации и шагово-циклической регрессии. Ил. 4.

Геохимические методы поисков и оценки пегматитовых месторождений. Шмакин Б. М. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Рассмотрены геохимические методы поисков редких металлов и слюдяносных пегматитов по первичным ореолам рассеяния, а также индикаторы оценки специализации пегматитов по составу их минералов. Особое внимание уделено происхождению ореолов пегматитовых тел. Обсуждены некоторые вопросы методики изучения первичных ореолов, показана необходимость их минералогического и петрографического исследования.

Оценка рудоносности гранитоидных массивов. Козлов В. Д. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Возможность оценки рудоносности гранитных интрузий определяется генетическим характером связи с гранитами редкометалльного оруденения. Геолого-петрохимические признаки рудоносности лишь необходимы, но недостаточны для выделения рудоносных интрузий среди им подобных гранитоидных массивов. Однозначное выделение рудоносных массивов возможно на основе сочетания геолого-петрохимических признаков и данных по редкоэлементному составу гранитов. Показано важнейшее значение геологического выделения лейкогранитных образований при решении вопросов рудоносности гранитных систем. Конкретная рудоносность интрузий определяется степенью концентрации в гранитах группы гранитофильных элементов и летучих (граниты субредкометалльные, редкометалльные ультраредкометалльные) и их объемом, зависящим прежде всего от принадлежности рудоносного гранитоидного тела к главной (наиболее перспективной) или заключительной фазам. Ил. 3, табл. 2.

УДК 540.84

Применение геохимических методов поисков в горно-таежной зоне. Загоскин В. А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Рассматриваются специфические ландшафтные особенности горно-таежной зоны, влияющие на характер проявления вторичных литохимических ореолов вблизи дневной поверхности. Отмечается высокий суммарный процент площадей закрытых категорий. Подчеркивается необходимость повышения глубинности геохимических методов и дифференцированного подхода к выбору рациональных методик на конкретных изучаемых площадях. На стадии общих поисков обосновывается целесообразность широкого использования лито- и гидрохимических исследований речных пьестов рассеяния при проведении детализационно-заверочных работ на локальных площадях, выделенных по потокам рассеяния, рекомендуются различные варианты комплексного использования геохимических поисковых методов. Описывается ряд специальных модификаций геохимических методов, разработанных применительно к особо трудным поисковым условиям горной тайги.

УДК 550.42 : 550.844

Поиски по пьесткам рассеяния в районах с развитой горно-промышленной деятельностью. Филиппова Л. А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Рассматриваются вопросы техногенного загрязнения рек районов с развитой горно-промышленной деятельностью и возможности применения для их опьескования метода по лито- и гидрохимическим потокам рассеяния.

Техногенное загрязнение рек сильно сказывается при отборе проб с поверхности, но почти полностью снимается, если пробы брать с глубины 40—50 см. Для этого целесообразно использовать обрывы пойменного берега или проходить закопучи. В пробы отбирается мелкий материал из заполнения гравийно-галечных отложений. При наличии насыщенного слоя, состоящего из отходов добычи и переработки руд, пробы следует отбирать в 40—50 см ниже этого слоя тоже на русловых отложениях.

Разработка россыпей не вызывает затруднений при поисках по потокам рассеяния. Показана целесообразность для поисков глубокозалегающих месторождений использовать гидрохимический метод. Ил. 7.

УДК 550.46 : 550.40

Вспрьсы формирования водных пьестков рассеяния рудных месторождений Шварцев С. Л., Удодов П. А., Рассказов Н. М. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Обращено внимание на то, что поиски глубокозалегающих месторождений гидрогеохимическим методом требуют решения большого комплекса разнообразных вопросов, связанных с условиями обогащения вод рудообразующими элементами, формами их миграции в водах и т. д., применительно к конкретным геолого-структурным особенностям исследуемой территории. В этой связи рассмотрена модель формирования водного потока рассеяния в районе открытого оруденения и освещены общие положения формирования вторичных ореолов и потоков рассеяния. Ил. 2.

УДК 550.84

О поисках глубокозалегающих рудных месторождений по солевому, водному и газовому ореолам. Свешиников Г. Б. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Рассматриваются возможности использования наложенных литохимических ореолов, впервые предсказанных Н. И. Сафроновым водных и газовых ореолов при поисках глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых; дается рекомендация по комплексному применению гидрохимической, атмосферической и сорбционно-солевой съемки на разных стадиях поисковых и разведочных работ; приводятся примеры эффективного применения этих методов. Ил. 2.

УДК 550.84.092.2

Региональные гидрогеохимические поиски по речной сети. Комаров В. С., Лопаткина А. П., Андреев А. Г., Сергеев А. Н., Бойко О. Д., Вьюшин В. А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Гидрогеохимическая съемка речного стока — разновидность реконспирочных геохимических методов, предназначенных для осгешения рудоносности больших территорий и обнаружения рудных провинциальных поясов, районов и узлов, проявившихся в виде областей аномальных концентраций элементов в поверхностных водах и отложениях гидросети. Большие размеры объектов поисков позволяют проводить лито- и гидрогеохимическое опробование по редкой сети, что при использовании транспортных средств обеспечивает высокую оперативность съемки при небольших затратах на единицу площади. Метод широко используется в СССР и других странах для оценки минеральных ресурсов. Ил. 3, табл. 3.

УДК 550.84.092 : 533 (571)

Ландшафтно-геохимические условия и поиски рудных месторождений в Джидинском районе Забайкалья. Т а й с а е в Т. Т. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Рассматриваются особенности истории формирования геохимических аномалий в горно-таежных ландшафтах, где широко проявились неогеновый и четвертичный базальтовый вулканизм, явления подрудры и асимметрии речных долин. На основе районирования Джидинского рудного района показана эффективность различных геохимических методов поисков. Поиски по потокам рассеяния наиболее применимы в пределах глубоководно-песчаных междуречий. На северных солифлюкционных склонах и болотах рекомендуются биогеохимические съемки и поиски по железистым осадкам, на курумных склонах — по суффозионным ореолам. Большое значение придается глубинным методам исследований по порфобленным вторичным ореолам и потокам рассеяния, образовавшимся в древних склоновых, аллювиальных и озерных отложениях в пределах подрудных речных долин. Ил. 3

УДК 540.84

Состояние применения и геолого-экономическая эффективность геохимических методов поисков в СССР. Г л у х о в В. А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Приводятся данные об экономической эффективности проведения геохимических работ с учетом поисковых условий в различных районах страны. Рассматриваются факторы, влияющие на эффективность геохимических методов, и причины их обуславливающие. Дается расчетная стоимость рентабельной литохимической съемки в горно-таежных ландшафтах. Табл. 3.

УДК 550.84

Проблема совершенствования геохимических поисков в Западном Забайкалье. Ж б а н о в Э. Ф., Ф и л ь к о А. С., Л б о в В. А., Ш о б о г о р о в П. Ч. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Рассматривается современное состояние геохимических работ на территории Бурятской АССР. Намечаются главные направления дальнейшего их совершенствования: повышение эффективности работ на основе применения рациональных математических методов обработки и обобщения данных геохимических съемок; выявление рудного резерва в закрытых районах; стандартизация технологии и документации всех видов опробования; организация геохимических поисков; подготовка квалифицированных кадров. Ил. 1.

УДК 550.84

Использование и эффективность геохимических методов поисков в Белоруссии. Л у к а ш е в В. К., Л у к а ш е в К. И. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Рассматриваются примеры применения различных геохимических методов поисков (литогеохимических, биогеохимических по солевым ореолам, металлоорганическим комплексам, с использованием искусственных сорбентов и др.) в условиях БССР, регионе с мощным осадочным покровом. Отмечается важность проведения опытно-методических работ для подбора оптимальных вариантов и необходимость усиления роли геохимической науки при поисках месторождений. Ил. 3.

УДК 550.84.092 : 553(571)

Условия применения геохимических методов поисков на Украине. М и ц к е в и ч Б. Ф. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1981.

Рассматриваются ландшафтно-геохимические особенности территории Украинской ССР. Выделяется 14 различных ландшафтно-геохимических районов, каждый из которых характеризуется одинаковыми или достаточно близкими природными условиями ведения геохимических поисков. Определяются комплексы геохимических методов, наиболее эффективных в тех или иных ландшафтно-геохимических обстановках. Подчеркивается необходимость дальнейшего более углубленного изучения условий применения геохимических методов, особенно в основных рудных регионах республики (Донбасс, Закарпатье и др.). Табл. 1.

3 р. 10 к.

3475



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ