

А. А. САУКОВ

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
ПОИСКОВ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ



А. А. САУКОВ

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Под редакцией М. Г. В а л я ш к о

*Допущено Министерством
высшего и среднего
специального образования РСФСР
в качестве учебного пособия
для геологических факультетов
государственных университетов*

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

1 9 6 3

Александр Александрович Сауков

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Редактор *И. С. Карпова*
Художник *М. М. Носова*
Художественный редактор *К. И. Журиная*
Технический редактор *М. С. Ермаков*

Сдано в набор 30/VII 1963 г.	Подписано к печати 26/XI 1963 г.		
Л-70926	Формат 60×90 ¹ / ₁₆	Печ. л. 15,5	Уч.-изд. л. 14,9
Изд. № 337	Заказ 635	Тираж 6000	Цена 67 коп.

Типография Изд-ва МГУ. Москва, Ленинские горы
Издательство Московского университета
Москва, Ленинские горы, Административный корпус.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых постепенно приобретают все более широкое признание, по мере того как совершенствуются их теоретические основы и уточняется техника практического применения. В дальнейшем, по мере истощения фонда легко открываемых месторождений, роль этих методов, безусловно, будет все более возрастать. Поэтому необходимо готовить соответствующие кадры исследователей, которые, будучи знакомы с теоретическими основами геохимии, могли бы плодотворно заниматься геохимическими поисками. В настоящее время курс геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых введен в ряде высших учебных заведений СССР, однако учебников и соответствующих учебных пособий по этому курсу пока нет, что создает большие трудности для преподавателей и особенно для студентов.

Настоящая книга, составленная автором на основе лекций, прочитанных им в 1959—1962 гг. для студентов-геохимиков Московского государственного университета, имеет целью в какой-то мере восполнить указанный пробел и служить кратким пособием по указанному курсу. Книга, по мнению автора, может оказаться полезной не только для студентов, но также и для тех геологов, которым в своей практической деятельности придется иметь дело с геохимическими методами поисков.

Содержание указанного курса и его программа еще далеко неполностью определились, много дискуссионного пока и в трактовке некоторых вопросов теории и практики геохими-

ческих методов поисков. В этом автор видит возможное оправдание тех неизбежных в связи с этим недостатков, которые обнаружатся в книге. За все ценные критические замечания автор будет весьма признателен.

Глубокую благодарность автор выражает А. П. Соловову, М. Г. Валяшко, А. В. Миловскому, А. И. Тугаринову и И. С. Карповой, которые прочитали рукопись книги и сделали ряд ценных замечаний, учтенных автором.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью прогресса человеческого общества является постоянно и все более быстрыми темпами возрастающее потребление различных видов минерального сырья: металлургического, химического, энергетического и т. д. При этом возрастает как число используемых человечеством химических элементов (в чистом виде и в виде соединений), так и сами масштабы добычи и потребления этих элементов. Для иллюстрации этого положения достаточно привести следующие примеры.

По подсчетам В. И. Вернадского, до XVIII столетия человек использовал всего лишь 19 химических элементов, в XVIII в.— 28, в XIX в.— 50 и в начале XX в.— 59 элементов. За последние десятилетия этот список пополнился еще большим числом элементов, в том числе трансурановых, а также значительным числом активных и стабильных изотопов. Еще быстрее возрастает потребление отдельных элементов: по подсчетам А. Е. Ферсмана, сделанным в 1934 г., за последнее столетие ежегодное потребление железа, марганца, меди и каменного угля возросло более чем в 50 раз, а потребление алюминия, калия, молибдена и вольфрама — в несколько сот раз. Добыча многих полезных ископаемых за последние 30—40 лет превысила суммарную их добычу за всю предыдущую деятельность человечества. Особенно поразительны за последние годы темпы роста добычи урана — важнейшего сырья для атомной промышленности: мировая добыча его возросла с немногих тонн до многих тысяч тонн в год. В дальнейшем темпы добычи полезных ископаемых, очевидно, еще более будут возрастать; свидетельством этому являются, например, планы развития нашего народного хозяйства на ближайшие 20 лет.

Быстрый рост потребления химических элементов и их

природных и искусственных соединений приводит, а для некоторых стран и районов уже и привел, к постепенному истощению фонда легко открываемых месторождений, выходящих непосредственно на земную поверхность. Находить подобные месторождения было сравнительно легко и поэтому история горного дела знает немало примеров, когда промышленно важные руды разных металлов и неметаллов, месторождения драгоценных камней, залежи каменного угля и других полезных ископаемых находились не только специалистами-геологами, но и просто любителями, особенно охотниками и пастухами, в обрывах гор, по долинам рек и ручьев, под корнями вывороченных деревьев — там, где эти следопыты проходили.

Однако число районов, пока что не обследованных геологами и не имеющих соответствующих геологических карт, очень быстро сокращается; относительно быстро происходит изучение новых районов обычными геологическими визуальными методами, позволяющими открывать месторождения, выходящие непосредственно на земную поверхность и вовлекать затем их в разведку и эксплуатацию. Наряду с указанными «легко открываемыми» месторождениями, фонд которых, особенно в обжитых районах, быстро истощается, имеются месторождения тех же полезных ископаемых, не выходящие непосредственно на земную поверхность, а залегающие на той или иной глубине, в результате того, что они перекрыты более молодыми отложениями или не вскрыты современным эрозийным срезом. Эти месторождения, в отличие от легко открываемых месторождений первой категории, обычно называют «трудно открываемыми», так как обычными простейшими визуальными способами обнаружить их невозможно. Находки подобных месторождений не специалистами практически уже невозможны, поскольку они для прямого наблюдения недоступны.

Есть веские основания утверждать, что подобные «трудно открываемые» месторождения представляют очень большой практический интерес, так как число их и суммарные запасы заключенных в них руд очень велики и во много раз превосходят то и другое для категории «легко открываемых» месторождений. Этот вывод легко можно сделать, рассматривая геологические карты больших территорий. Как правило, большая их часть бывает перекрыта молодыми рыхлыми отложениями и скрыта под почвенным покровом, выходы коренных пород встречаются не всегда, они обычны в горных районах и, как правило, отсутствуют в долинах. Совершенно очевидно, что искать месторождения, залегающие среди тех или

инных изверженных, осадочных или метаморфических пород в случае, когда эти породы не выходят на поверхность, гораздо труднее, чем в том случае, когда как сами породы, так и особенно залегающие среди них месторождения обнажаются на поверхности. Это подтверждается и практикой поисковых работ. Например, давно было замечено, что в Восточном Забайкалье подавляющее число известных месторождений расположено на южных склонах водоразделов. Это объясняется тем, что в силу физико-географических условий южные склоны обычно лишены лесной растительности и изобилуют выходами коренных пород, т. е. являются благоприятными для визуальных поисковых работ, в то время как северные склоны покрыты тайгой, почти не имеют обнажений коренных пород, трудны для поисков и в результате выглядят внешне безрудными, хотя в геологическом отношении принципиально ни в чем не отличаются от южных склонов и, вероятно, не менее их богаты месторождениями, которые относятся уже к категории «трудно открываемых» и поэтому пока не обнаружены.

Все сказанное объясняет тот широкий интерес, который все более и более проявляется к методам поисков «трудно открываемых» месторождений различных полезных ископаемых как в Советском Союзе, так и в других странах. Среди этих методов наряду с собственно геологическими и геофизическими в последние годы начинают играть все более видную роль методы геохимические, основанные на выявлении и интерпретации ореолов и потоков рассеяния элементов, создающихся около месторождений и генетически связанных с ними.

Ореолы и потоки рассеяния образуются около месторождений в результате процессов перемещения элементов, осуществляемых в разных формах и под влиянием различных внутренних и внешних факторов их миграции. Поэтому теоретической основой геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых является современное учение о миграции химических элементов.

Миграция элементов происходит как в процессе образования самого месторождения, так и после этого в результате его разрушения. Ореолы рассеяния, образующиеся в первом случае, сингенетичны с месторождением и называются первичными. Во втором случае они будут эпигенетичны по отношению к месторождению и называются вторичными. Размеры как первичных, так и особенно вторичных ореолов и потоков рассеяния обычно значительно превосходят размеры самих

месторождений или отдельных рудных тел и, что особенно важно для поисков залегающих на глубине месторождений, эти ореолы и потоки часто выходят на земную поверхность и тем самым становятся доступными непосредственному наблюдению, правда с применением специальных методов опробования и интерпретации. Таким образом, ореолы как бы расширяют площади самих месторождений и в ряде случаев как бы выводят их на поверхность. Все это существенно облегчает поиски как месторождений, выходящих на земную поверхность, так и месторождений «трудно открываемых».

В отличие от самих месторождений тех или иных полезных ископаемых, обычно состоящих из ассоциаций определенных минералов достаточно крупных размеров и потому легко определяемых визуально, ореолы и потоки рассеяния (за исключением грубообломочных механических ореолов), как правило, не содержат видимых простым глазом минералов искомого элемента и потому требуют для своего обнаружения применения специальных методов опробования и анализа. В этом специфика геохимических методов поисков.

Геохимические методы применяются в настоящее время для поисков самых разнообразных месторождений полезных ископаемых, в том числе месторождений олова, вольфрама, молибдена, свинца, цинка, меди, урана, тория, ртуть, кобальта, никеля, бора, бериллия, селена, нефти, горючих газов и многих других.

Путем применения геохимических методов поисков за последние годы в СССР обнаружено значительное число новых месторождений разных полезных ископаемых и новых рудных тел в пределах уже известных месторождений. Важно отметить, что часто находки новых месторождений были сделаны на площадях, ранее уже покрытых обычными геологическими съемками и соответствующими поисковыми маршрутами; это указывает на большие возможности геохимических методов. В настоящее время некоторые из геохимических методов, особенно металлометрия для поисков рудных месторождений и газовая съемка и газовый каротаж для поисков залежей нефти и газа, заняли уже достаточно прочное место среди других поисковых методов и год от года применяются все более и более широко. Так, например, за период с 1935 по 1962 г. в СССР было отобрано в общем свыше 60 000 000 металлометрических проб, причем за это время объем указанных работ вырос в сотни раз (в 1948 г. было обработано 67 000 проб, а в 1961 г.— свыше 6 миллионов). На ближайшие

годы предусмотрено еще более значительное расширение металлометрических работ. Другие геохимические методы поисков (гидрогеохимический, биогеохимический и др.) пока еще не получили столь широкого распространения, как металлометрия и газовая съемка, и находятся в стадии разработки и экспериментальной проверки, но, безусловно, в будущем также будут играть видную роль при поисках многих месторождений в некоторых определенных условиях. Так месторождение меди на Южном Урале было недавно открыто в результате разведок на основании гидрогеохимических показателей.

Все более возрастающий интерес к теории и практике геохимических методов поисков иллюстрируется также рядом конференций и совещаний, посвященных этим методам. Таковы, например, Первое Всесоюзное совещание по геохимическим методам поисков рудных месторождений, созванное Министерством геологии и охраны недр СССР весной 1956 г., Всесоюзное совещание по геохимическим и радиометрическим методам поисков месторождений нефти и газа, состоявшееся в Академии наук СССР весной 1958 г., совещание по научным основам поисков слепых рудных тел эндогенных месторождений, созванное Академией наук СССР и Министерством геологии и охраны недр СССР осенью 1958 г., Второе Всесоюзное совещание по геохимическим методам поисков полезных ископаемых, созванное Государственным геологическим комитетом и Академией наук СССР в апреле 1963 г. Эти совещания вызвали широкий интерес со стороны ученых и геологов-практиков, подвели итоги нашим знаниям в области теоретических основ геохимических методов и на конкретных примерах показали значение этих методов для поисковой и разведочной практики.

Глава 1. ИЗ ИСТОРИИ РАЗРАБОТКИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ

Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых впервые были предложены и стали применяться в России начиная с 1917 г., когда Н. С. Курнаков, изучая калий в рассолах соляных варниц, открыл Верхне-Камское месторождение калийных солей и прогнозировал находки подобных месторождений и в других районах.

В 1932 г. В. А. Соколов предложил для поисков нефтяных залежей метод газовой съемки, основанный на определении в почвенном воздухе метана и других углеводородов. В том же году Н. И. Сафронов начал применять для интерпретации электрических анамалий на полиметаллических месторождениях Рудного Алтая изучение рыхлых отложений с целью определения в них различных металлов, заложив тем самым понятие о вторичных ореолах рассеяния элементов вблизи рудных месторождений и основы металлометрической съемки.

В 1934 г. А. П. Соловov на оловорудном месторождении Хапчеранга доказал наличие вторичных ореолов рассеяния олова. В 1935 г. металлометрические работы в Восточном Забайкалье, проведенные указанным автором, привели к первым открытиям промышленных месторождений, чем впервые была определена практическая ценность металлометрического метода. В то же время проводились металлометрические исследования на месторождениях олова, золота, меди и других металлов в разных районах СССР (М. Ф. Зенин, Б. Л. Флеров и др.), причем эти исследования носили соответственно

названия станнометрических, ауromетрических, купрометрических и т. д. съемок. В 1936 г. А. А. Сауков выявил широкие ореолы рассеяния ртути в коренных породах, окружающих некоторые ртутные месторождения, рассматривая эти ореолы как результат миграции металла в газообразном состоянии.

Большое значение для развития и популяризации металлотметрической съемки имела опубликованная в 1936 г. статья Н. И. Сафронова «К вопросу об ореолах рассеяния месторождений полезных ископаемых и их использования при поисках и разведке». В этой статье, на основании проведенных к тому времени исследований, автор впервые в мировой литературе дал общий анализ понятия «ореолы рассеяния», привел их классификацию и подвел первые итоги применения новой методики поисков полезных ископаемых. Эта работа Н. И. Сафронова послужила основой для ряда последующих исследований, была широко использована А. Е. Ферсманом в его монографии «Геохимические и минералогические методы поисков» и не потеряла своего значения до самого последнего времени.

Успешному развитию геохимических методов поисков содействовали успехи в аналитической области; были разработаны и внедрены в практику методы полуколичественного и количественного спектрального анализа образцов горных пород, руд, минералов, а также специальные колориметрические, люминесцентные, микрохимические и другие химические и физико-химические методы анализа, позволяющие в короткие сроки производить с достаточной точностью огромное число определений разных элементов, присутствующих в породах обычно в ничтожно малых количествах.

В 1938 г. ЦНИГРИ была опубликована «Техническая инструкция по геофизическим методам разведки», в которой содержался составленный С. Д. Миллером раздел по технике металлотметрической съемки. Итоги практического применения геохимических методов для поисков рудных месторождений были подведены в 1941 г. в работе Е. А. Сергеева «Физико-химический метод поисков рудных залежей»¹.

Особое значение для разработки теоретических основ, обобщения накопленного опыта и перспектив дальнейшего развития геохимических методов имела упомянутая выше известная монография А. Е. Ферсмана «Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых», вышедшая в 1940 г.

¹ Материалы ВСЕГЕИ. Геофизика. Сб. 9—10. Госгеолиздат, М., 1941.

Один из крупнейших знатоков рудных месторождений С. С. Смирнов придавал разработке и практическому внедрению геохимических методов поисков также весьма большое значение. Своими работами по зоне окисления сульфидных месторождений он внес большой вклад в разработку теоретических основ геохимических методов поисков, особенно гидрогеохимического метода, разработанного несколько позднее. В своей статье «Некоторые общие вопросы изучения рудных месторождений», опубликованной в 1946 г., С. С. Смирнов весьма высоко оценил перспективы металлометрической съемки¹.

Особенно быстро развивалась у нас металлометрическая съемка, что было связано с серьезными практическими успехами, сопровождавшими ее применение. Вначале металлометрические съемки проводились в Забайкалье, в Приморье и в Западной Сибири; с 1943 г. они были начаты С. Д. Миллером в Казахстане и с тех пор в продолжение уже многих лет особенно успешно и широко там применяются. В Казахстане ежегодно выполняется до 50% общесоюзного объема всех металлометрических съемок, который, как уже отмечалось, достигает многих миллионов проб ежегодно. В результате металлометрических съемок в Казахстане было открыто или заново переоценено свыше 200 рудопроявлений цветных и редких металлов, в том числе выявлен ряд крупных промышленных объектов. В результате металлометрической съемки были открыты многие месторождения разных металлов и в других районах СССР, в том числе в Забайкалье, на Дальнем Востоке, в Средней Азии.

Металлометрическая съемка, как весьма эффективный новый геохимический метод поисков месторождений полезных ископаемых, получила широкое признание и приказом министра геологии и охраны недр СССР в 1955 г. была введена как обязательное звено при всех геолого-съёмочных, поисковых и разведочных работах любых масштабов. Металлометрические съемки проводятся согласно специальной инструкции, составленной в 1956 г. одним из крупнейших специалистов и создателей метода А. П. Солововым.

Одновременно проводилась разработка, проверка и практическое применение других геохимических методов поисков и разведки. Особенно серьезные результаты были достигнуты в области изучения и использования газовых ореолов рассеяния. В. А. Соколовым и другими исследователями были осве-

¹ С. С. Смирнов. Избр. труды. Изд-во АН СССР, М., 1955.

щены теоретические вопросы миграции углеводородов и нефти, разработаны тончайшие методы анализа газов, предложена специальная аппаратура и проведены многочисленные исследования в различных районах СССР. В 1947 г. вышла книга В. А. Соколова «Прямые геохимические методы поисков нефти», где с большой полнотой были освещены относящиеся сюда вопросы и подведены итоги проведенных исследований. Наряду с собственно газовой съемкой за это время у нас были разработаны и некоторые другие геохимические методы поисков нефти и газа, в том числе люминесцентно-битумный (В. Н. Флоровская и В. Г. Мелков), бактериологический (Г. А. Могилевский), газовый каротаж, битумный каротаж, почвенно-геохимический метод (В. А. Ковда и П. С. Славин) и другие.

Прошедшее весной 1958 г. Всесоюзное совещание по геохимическим и радиометрическим методам поисков нефти и газа, созванное Академией наук СССР, подтвердило большую эффективность указанных методов для поисков залежей нефти и газа в разных районах Советского Союза и наметило пути дальнейших исследований в этой области. Труды этого совещания опубликованы.

Начало разработки гидрогеохимических методов относится у нас к 1917 г. Е. А. Сергеев в 1936 г. изучил водные ореолы рассеяния для полиметаллических месторождений района р. Заводинской на Алтае. О. А. Алекин в 1938 г. доказал, что содержание золота в водах некоторых приисков Дальнего Востока значительно повышено, по сравнению со средним содержанием его в водах всего района. В. И. Николаев в 1938 г. на ряде примеров показал, что при поисках месторождений калия, бора и брома большую помощь может оказать изучение содержания этих элементов в водах. Интересные работы были проведены В. А. Сулиным и другими исследователями по применению гидрогеохимического метода при поисках нефтяных залежей.

Несколько позднее большие систематические работы по изучению водных ореолов рассеяния и использованию их для поисковых целей были проведены А. А. Бродским, А. И. Германовым, А. А. Сауковым, А. И. Перельманом, А. Н. Токаревым, А. В. Щербаковым, И. И. Долухановой, П. А. Удодовым и рядом других исследователей. Часть этих исследований опубликована. Результаты работ по гидрохимическому методу поисков месторождений урана были доложены на Женевской международной конференции по мирному использованию атомной энергии.

Несмотря на известные успехи в деле разработки теоретических основ гидрогеохимического метода, практическое его использование пока еще совершенно недостаточно, что явно ненормально, учитывая большую глубинность этого метода и его особенно значительные потенциальные возможности для поисков скрытых месторождений.

Теоретические основы биогеохимического метода были заложены также в нашей стране трудами В. И. Вернадского и А. П. Виноградова. Д. П. Малюга начиная с 1937 г. систематически проводит почвенно-флористические исследования вначале на месторождениях силикатного никеля, а затем и ряда других полезных ископаемых — кобальта, хрома, меди, урана и др.

С. М. Ткалич в 1938 г. и последующих годах изучает возможность использования ряда растений в качестве индикаторов при геохимических методах поисков и разведки некоторых металлов на Дальнем Востоке и в Красноярском крае.

А. П. Виноградов вместе со своими сотрудниками, продолжая широким фронтом биогеохимические исследования, начатые ранее В. И. Вернадским, обосновывает зависимость зольного состава растений от состава почв и материнских пород и в ряде опубликованных работ формулирует основные положения биогеохимического метода поисков месторождений полезных ископаемых. Особого внимания среди этих его работ заслуживает монография «Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах», вышедшая в 1950 г.

Значительно раньше, в начале нашего столетия, работами Н. Н. Высоцкого на Северном Урале, Б. А. Келлера на Алтае и др., обративших внимание на приуроченность определенных видов растений к определенным материнским породам, были заложены основы геоботанического метода поисков. В более поздние годы этот метод привлек к себе особое внимание ряда исследователей, особенно С. В. Викторова, который провел ряд интересных исследований в этой области и обобщил накопившийся материал в ряде своих работ, в том числе в книге «Использование геоботанического метода при геологических и гидрогеологических исследованиях».

Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых впервые, как уже отмечалось, стали разрабатываться и применяться в Советском Союзе. Приоритет нашей советской науки и практики в этом отношении является несомненным, это отмечают и сами иностранные авторы. Так, например, известный американский исследователь в этой области Х. Е. Хоук в статье, посвященной геохимическим

поискам руд, напечатанной в 1949 г., пишет, что эти работы не развивались «до тех пор, пока не были (примерно с 1932 г.) проведены эксперименты советскими геологами. С этого времени геохимические методы со значительным успехом стали развиваться и применяться во все усиливающемся масштабе в СССР»¹.

С середины 30-х годов нашего столетия шведские исследователи стали применять для поисков месторождений биогеохимический метод; они разработали технику опробования растений и их химических анализов и с успехом применяли этот метод при поисках месторождений цинка, олова и других металлов. Примерно в то же время геохимические методы стали применяться в Финляндии для поисков месторождений никеля, меди, цинка и молибдена.

В послевоенное время, начиная с 1945 г., изыскания в этом направлении были начаты Геологической службой США и некоторыми частными горнорудными компаниями и университетскими лабораториями. Примерно с того же времени геохимические методы поисков стали применяться также в Англии и ее колониях, во Франции, Канаде и некоторых других странах.

Судя по опубликованным данным значительные и интересные исследования в области разработки теории геохимических методов поисков и практического ее применения провели следующие иностранные ученые: Х. Е. Хоукс, Т. С. Ловеринг, Х. Т. Моррис, Х. Альмонд, В. П. Соколов, Ж. Р. Купер, Л. С. Хафф, Р. Б. Фултон и другие — в США; Дж. Узбб и А. П. Мильман — в Западной Африке; У. Х. Гросс, Т. В. Уоррен и Р. Е. Делаво — в Канаде; К. Ранкама и В. Мармо — в Финляндии и другие.

Наиболее интересные исследования иностранных авторов в области геохимических методов поисков, опубликованные до 1953 г., были переведены на русский язык и изданы в 1954 г. в специальном сборнике «Геохимические методы поисков рудных месторождений», вышедшем под редакцией В. И. Смирнова.

Таким образом, зародившись первоначально в СССР под влиянием прогрессивных геохимических идей В. И. Вернадского, А. Е. Ферсмана, С. С. Смирнова и других наших выдающихся ученых геохимические методы за прошедшую четверть

¹ Особого упоминания заслуживает недавно вышедшая большая сводка Х. Хоукса и Д. Узбба «Geochemistry in Mineral Exploration», в которой дано довольно полное освещение современного состояния проблемы геохимических методов поисков.

века получили достаточно широкое развитие как у нас, так и в других странах, привлекли к себе внимание многих исследователей и дали немало практически ценных результатов. Некоторые из этих методов, особенно металлометрическая съемка, газовая съемка и газовый каротаж, выдержали строгое испытание времени и прочно вошли в арсенал проверенных поисковых методов; другие, как например, гидрогеохимический и биогеохимический методы, пока находятся по существу в стадии теоретической разработки и практической проверки, но полученные уже и здесь результаты дают основание утверждать, что эти методы также окажутся в дальнейшем весьма перспективными. Это особенно относится к гидрогеохимическому методу, одному из наиболее глубинных, а потому и особенно перспективных поисковых методов.

Проведенные в СССР исследования по геохимическим методам поисков нашли свое отражение в значительной литературе; среди вышедших работ имеется несколько монографий. Из них помимо упомянутых выше необходимо отметить вышедшую в 1957 г. книгу И. И. Гинзбурга «Опыт разработки теоретических основ геохимических методов поисков руд цветных и редких металлов», где автор помимо опубликованной литературы использовал и большой собственный опыт исследований в этой области. Большой интерес представляет также вышедшая в 1959 г. книга В. И. Красникова «Основы рациональной методики поисков рудных месторождений», где наряду с геологическими и геофизическими методами кратко рассматриваются и геохимические, причем особое внимание уделяется рациональному комплексированию тех и других.

Опыт поисков нефти и газа обобщен в коллективном труде А. А. Карцева, З. А. Табасаранского, М. И. Суббота, Г. А. Могилевского «Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений», опубликованном в 1954 г.

Большой интерес представляют также труды упомянутых выше Всесоюзных совещаний по геохимическим методам поисков, где был обобщен имеющийся опыт и намечены ближайшие задачи.

Глава 2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

Геохимические методы поисков основаны на массовом опробовании горных пород, почв, природных вод, растений, почвенного и подпочвенного воздуха и на определении в них, как правило, весьма малых концентраций тех или иных элементов. Это вытекает из основной задачи геохимических поисков — обнаружения ореолов и потоков рассеяния химических элементов, генетически связанных с месторождениями полезных ископаемых и характеризующихся, как правило, достаточно низкими концентрациями искомых элементов, хотя и превышающими их кларки.

Сама разработка геохимических методов поисков стала возможной лишь после того, как предварительно были разработаны соответствующие методы анализа, позволившие выявлять указанные ореолы и потоки рассеяния. Эти методы весьма разнообразны, но все они обладают некоторыми общими особенностями. Этими особенностями являются: а) высокая чувствительность, б) достаточная точность и в) высокая производительность.

Особенно широкое применение при геохимических поисках, в частности при металлотрической съемке, нашел эмиссионный спектральный анализ. Этот метод отличается исключительно высокой производительностью и простотой выполнения и не требует сложных операций по предварительной обработке проб. Он обладает очень высокой чувствительностью и позволяет одновременно анализировать пробу на десятки разных элементов. Кроме того, получаемые при

этом методе спектрограммы позволяют производить оценку содержания элементов достаточно объективно и могут сохраняться как документы, которые в любое время могут быть проверены.

Практика металлометрических съемок показала, что одна партия за год отбирает до 100 000 металлометрических проб; соответственно производительность спектральных лабораторий, обслуживающих эти партии, является очень высокой. Так, например, в спектральных лабораториях Казахского геофизического треста, по данным, опубликованным Е. А. Сергеевым и П. А. Степановым, при соответствующей четкой организации труда, на один спектрограф в летние месяцы приходится до 1000 анализов в сутки с десятками тысяч определений. Это, конечно, очень высокая производительность, недоступная пока другим методам анализа. Отсюда дешевизна метода, что при массовых анализах представляет очень большое практическое значение. Раньше для оценки содержания определяемого элемента применялся «метод спектров сравнения», заключающийся в том, что на фотопластинке вместе с изучаемыми пробами фотографируются несколько спектров эталонов с известным содержанием элемента, который определяется. Сравнивая на спектрограмме визуальное почернение спектральных линий проб и эталонов, можно приблизительно определить содержание в пробах искомых элементов.

«Метод спектров сравнения» помимо малой точности имеет и другие существенные недостатки: он не позволяет одновременно количественно определять большое число элементов, требует относительно много времени на фотографирование эталонов и мало пригоден, когда содержание элементов в пробах сильно варьирует. Поэтому в практике геохимических поисков этот метод не нашел широкого применения.

Гораздо удобнее оказался «метод появления и усиления спектральных линий», впервые примененный у нас В. К. Прокофьевым в 1935 г. для определения содержания олова в рудах и получивший потом очень широкое распространение; этим методом были выполнены при металлометрических съемках миллионы анализов на различные элементы. Метод основан на том давно известном факте, что с увеличением концентраций данного элемента в пробе число характерных для него линий на спектрограмме увеличивается, причем появившиеся при низких содержаниях линии становятся более интенсивными. Если работа на спектрографе проводится при строго заданном режиме, можно составить соответствующие

таблицы, характеризующие связь между появлением спектральных линий и концентрацией элемента в пробе. Например, по данным М. М. Клера, при заданном режиме работы спектрографа концентрации свинца в пробе, равной 0,001%, соответствуют линии: 2833,06 Å — отчетливые, 2614,2 и 2802,0 Å — слабые. При концентрации свинца в 0,01% указанные линии усиливаются и появляются новые линии — 2663, 17 и 2873,3 Å и т. д.

Указанный метод является гораздо более быстрым и точным, чем упомянутый выше «метод сравнения» и поэтому нашел широкое применение в практике металлометрической съемки.

За последние годы в практику металлометрии все более внедряется методика ступенчатого ослабления спектров, предложенная М. М. Клером. Сущность ее состоит в том, что интенсивность освещения щели спектрографа посредством вращающегося сектора или специального ослабителя уменьшается ступенями на три порядка, в результате чего все линии на спектрограмме разбиваются на отдельные участки уменьшающейся интенсивности. Как и в предыдущем методе «появления и усиления линий», здесь для оценки интенсивности также используется порог чувствительности фотографической пластинки. Интенсивность каждой спектральной линии, а следовательно, и концентрация элемента в пробе, оценивается при просмотре спектрограммы: для этого достаточно отметить, через сколько ступеней ослабителя проникает интересующая спектральная линия и затем воспользоваться соответствующим градуировочным графиком, где по горизонтали нанесены логарифмы концентраций, а по вертикали — логарифмы интенсивности, выраженные числом ступеней ослабителя. Так, например, при десятиступенчатом ослабителе для спектральной линии молибдена 3170,3 Å при концентрации металла в пробе, равной 1% и выше, указанная линия будет «пробивать» 9 ступеней, при концентрации в 0,1% — 7 ступеней, при 0,01% — 5 ступеней, при 0,005% — 2 ступени и т. д.

Точность оценки интенсивности спектральных линий зависит от числа применяемых ступеней; так, при упомянутом выше ослабителе с 10 ступенями каждые три ступени ослабляют интенсивность линий в 10 раз. Метод ослабления интенсивности линий имеет ряд преимуществ перед другими методами: он требует просмотра лишь 1—2 спектральных линий для каждого элемента и на основании их позволяет оценить его концентрации в весьма широких пределах (от тысячных долей процента до нескольких процентов).

Поэтому данный метод позволяет по одной спектрограмме быстро провести определение десятков химических элементов, что затруднительно по методу появления линий, ввиду необходимости просмотра большого числа линий для каждого элемента.

Точность указанной методики достаточно высока, относительная ошибка для однотипных проб составляет ± 12 — 20% , для более сложных случаев (сульфиды и др.) ошибка возрастает до $\pm 50\%$. Относительно точности анализов, применяемых при геохимических поисках, необходимо отметить следующее. Как будет показано ниже, аномальные концентрации искоемых элементов в ореолах и потоках рассеяния обычно превышают в десятки, сотни, тысячи и более раз содержание тех же элементов за пределами указанных ореолов и потоков, которое обычно называют натуральным фоном.

Следовательно, для того, чтобы выявить ореолы и потоки рассеяния, достаточно относительно небольшая точность метода при его высокой чувствительности. Иногда для этой цели в первом приближении достаточно знать порядок величин. Однако при более детальных исследованиях, при расшифровке обнаруженных аномалий требуется гораздо большая точность анализа. Описанная спектральная методика, позволяющая весьма быстро в массовом масштабе анализировать пробы на десятки элементов с погрешностью до $\pm 50\%$, для целей геохимических поисков является вполне удовлетворительной.

С целью еще более сократить время, необходимое для производства спектральных анализов, Е. А. Сергеев и П. А. Степанов разработали скоростную методику полуконического спектрального анализа, производя полное сжигание навески за 2 мин. Для подавляющего числа элементов, как показали проведенные исследования, такой продолжительности сгорания вполне достаточно; при этом в плазму электрической дуги последовательно, в зависимости от температуры испарения, поступают все элементы, начиная от наиболее летучих и кончая более труднолетучими.

Как показали опыты, для испарения таких элементов, как Pb, Zn, Cd, Cu, As, Sb, Bi и др. достаточно 30 сек при силе тока 10—15 а; через 50—60 сек полностью возгоняются Ni, Co, Cr, V, Mo, Ge и др. Для наиболее труднолетучих элементов, каковы Nb, Ta, Th, Ce, Y, Be, Ba, Zr, полное скоростное сжигание за 2 мин осуществляется путем увеличения силы тока с 10 до 25 а и посредством уменьшения величины навески до 25 мг. Применяя эту методику, в пробах можно

определять следующие минимальные содержания элементов: Ag, Be — $1 \cdot 10^{-4}\%$; Cu, Mo — $3 \cdot 10^{-4}\%$; Pb, Sn, Ni, V, Bi, Ge, Ga и другие — $1 \cdot 10^{-3}\%$; Cr, Co, Re и другие — $3 \cdot 10^{-3}\%$; Zn, Sb, Cd, As, Ba и другие — $1 \cdot 10^{-2}\%$ и т. д.

Как видно из рассмотрения этих цифр, в ряде случаев чувствительность спектрального метода недостаточна, так как не позволяет определять кларковые содержания этих элементов. Эти трудности постепенно устраняются; так, например, указанным авторам удалось путем изменения формы и размеров электродов и посредством значительного увеличения навески повысить чувствительность определения группы халькофильных элементов, в том числе ртути до $2 \cdot 10^{-7}\%$, что позволяет анализировать на этот элемент практически почти все горные породы и минералы (кларк ртути, по нашим определениям, составляет $7 \cdot 10^{-6}\%$). Для ряда элементов необходимо дальнейшее усовершенствование методики, повышение ее чувствительности, в том числе для W, Sb, Te, Se и др.

С целью дальнейшего уменьшения ошибок при массовых спектральных анализах проб и дальнейшего сокращения сроков выполнения анализа, А. К. Русанов предложил специальный прибор, посредством которого порошок пробы вдувается струей воздуха в зону дугового разряда между электродами, питаемыми переменным током. При этом наблюдается значительная стабилизация режима горения дуги, что положительно сказывается на результатах анализа.

Спектральный анализ является основным и ведущим при металлометрической съемке, когда приходится анализировать пробы горных пород, минералов, руд, почв и рыхлых отложений, т. е. твердые фазы вещества. В случае водных и газовых ореолов рассеяния, т. е. для целей гидрогеохимических и газовых съемок, применяются другие методы.

Для определения химических элементов в природных водах применяются разные методы. Одни из них настолько специфичны и чувствительны, что позволяют определять те или иные элементы непосредственно из природного раствора, без предварительного обогащения. Другие требуют предварительного обогащения, поэтому являются более трудоемкими.

Высокой чувствительностью обладают различные колориметрические методы. Чувствительность в данном случае зависит от интенсивности и прочности окраски цветного соединения, получаемого при взаимодействии изучаемых элементов с соответствующими реактивами. Наиболее широкое применение для определения ионов ряда металлов

получил дифенилтиокарбазон (дитизон). Он дает с металлами ярко окрашенные комплексные соединения-дитизонаты разных цветов в зависимости от элемента и его концентрации. Дитизонаты получаются обычно при встряхивании раствора дитизона в четыреххлористом углероде с водным раствором металла. В основном дитизон применяют в качестве реактива для определения Co, Cu, Cd, Bi, Pb, Ag, Zn, причем для дитизонатов отдельных элементов характерна определенная величина рН раствора, чем и пользуются при анализе; для той же цели применяют соответствующие комплексообразователи, чтобы исключить влияние других ионов.

Чувствительность этого метода очень высока; применяя его, можно из объема воды в 50 мл определять свинец, цинк, медь и другие металлы при концентрациях их до нескольких миллионных долей грамма (γ) в литре. Высокая чувствительность дитизона на многие металлы заставляет предъявлять очень высокие требования к применяемым реактивам, дистиллированной воде и посуде: они не должны содержать этих металлов, чтобы не быть причиной грубых ошибок. Точность дитизонного метода в полевых условиях обычно не высока, но она достаточна для гидрогеохимических исследований, имеющих целью выявление водных аномалий.

Для анализа вод на некоторые элементы колориметрическим методом применяются и другие реактивы. Так, например, для определения малых концентраций молибдена применяется роданид аммония, который в кислом растворе дает с пентавалентным молибденом комплексное соединение, окрашенное в буровато-красный цвет. Роданид аммония или калия применяется также для определения вольфрама: в солянокислом растворе пентавалентный вольфрам с указанным реактивом дает комплексное соединение, окрашенное в желтовато-зеленый цвет. Помимо упомянутых реактивов применяются для указанных целей и некоторые другие, в том числе: диэтилдитиокарбамат — для определения следов меди, реактив Полежаева — для определения ртути и т. д.

В ряде случаев концентрация интересующих элементов в природных водах недостаточна для того, чтобы произвести их прямое определение тем или иным методом. В этом случае прибегают к предварительному обогащению, которое может осуществляться разными способами, в том числе: выпариванием пробы воды до небольшого объема или даже до сухого остатка; извлечением металлов из массы воды путем адсорбции на ионнообменных смолах-катионитах; соосаждением элементов со специальными соединениями-коллекторами и,

наконец, экстрагированием соединений металлов несмешивающимися с водой органическими реагентами и т. д.

Полученные в результате обогащения повышенные концентрации того или иного элемента могут в дальнейшем быть количественно определены тем или иным способом в зависимости от свойств элемента. Иногда это может быть сделано посредством спектрального анализа, например, в случае сухого остатка, полученного при выпаривании воды. Иногда для этого пользуются полярографическими или колориметрическими методами.

А. А. Резников для определения в водах Cu, Zn, Pb, Bi, Cd предложил предварительное их обогащение путем экстрагирования дитизонатов с последующим полярографическим определением. Д. П. Малюга с успехом производил полярографическое определение Cu, Ni, Co, Zn, Cd из концентратов, полученных при выпаривании вод с последующим осаждением металлов рубеоановой кислотой.

Н. А. Айдиньян для определения в водах урана применила соосаждение его с гидратом окиси алюминия; в дальнейшем уран определяется методом люминесценции перлов в присутствии фтористого натрия в ультрафиолетовом свете. Этот метод позволяет очень быстро и достаточно точно определять в 100 мл воды любые содержания урана, начиная с $1 \cdot 10^{-7}$ г/л.

В последнее время ею разработан весьма чувствительный метод определения в водах ртути; для этого ртуть предварительно концентрируется путем соосаждения с сульфидом свинца, затем отгоняется в специальных трубках, предложенных в свое время мной вместе с Н. Х. Айдиньян для определения ртути в рудах, и, наконец, количественно определяется колориметрическим методом с применением реактива Полежаева. Чувствительность этого метода достигает $5 \cdot 10^{-8}$ г/л.

В последние годы для целей экспрессных полевых исследований природных вод предложены специальные походные лаборатории, позволяющие в полевых условиях определять Mo, U, Zn, Pb и другие элементы.

Газовая съемка и газовый каротаж, применяемые для поисков залежей нефти и газа, требуют специальных методов анализа газов. Обычно вначале производится общий анализ газа, т. е. определяются главнейшие компоненты газовой смеси: углекислый газ, кислород, водород, азот, окись углерода и сумма углеводородных газов. Эти определения обычно производятся на приборе ВТИ (Всесоюзного теплотехнического института). Определение отдельных газов осуществляется частью путем поглощения их теми или иными реагентами

(углекислый газ — едкой щелочью, кислород — пирогаллолом), частью путем сжигания в определенных условиях (водород — в присутствии окиси меди, углеводороды — в присутствии кислорода воздуха над раскаленной платиновой спиралью). Азот вместе с благородными газами (аргон, гелий, неон, криптон, ксенон) определяется по разности между объемом взятого газа и суммой объемов уже определенных при анализе газов.

Особое внимание при анализе газа должно быть, очевидно, обращено на углеводороды: помимо определения их суммарного количества необходимо произвести отдельный анализ этих газов на метан и тяжелые углеводороды. Это обычно производится на специальных приборах, сконструированных В. А. Соколовым и другими исследователями, и основано на разгонке углеводородов при низких температурах и давлениях. Углеводородный газ вводится в прибор, из которого предварительно удален воздух и который погружен в дьюаровский сосуд с жидким воздухом. При температуре -180° все углеводороды за исключением метана сжижаются; метан удаляется путем откачки и определяется его объем. Затем температура повышается до -155 — -140° ; при этом испаряется этан, который откачивается и определяется. Затем при температуре от -135 до -120° отгоняется пропан; при температуре -120 — -100° отгоняется бутан; в остатке получается сумма пентана и других более тяжелых углеводородов.

Некоторые модели стационарных ртутных приборов, применяемые для анализа микроконцентраций углеводородных газов, позволяют производить микроанализ с чувствительностью до $10^{-5}\%$.

В последние годы для анализа газов, в том числе в полевых условиях, используются также хроматографические методы, основанные на адсорбции углеводородных газов различными адсорбентами (активированным углем, силикогелем, цеолитами и т. д.), причем чувствительность определений отдельных компонентов здесь достигает $10^{-6}\%$.

При поисках месторождений радиоактивных руд эманационным методом необходимо определять газообразный радон. Метод его определения (так же, как и методы определения его аналогов — торона и актинона) основан на том, что как эманации, так и их ближайшие продукты распада испускают α -частицы, сильно ионизирующие воздух, что используется в специальных измерительных приборах. Эманации, выделяемые радиоактивными элементами, вводятся в герметически закрытую ионизационную камеру, после чего измеряется

нонизационный ток насыщения, создаваемый α -лучами эманации и ее продуктов распада. В качестве измерительного прибора при этом применяются специальные электрометры. Обычно измерения содержания радона производятся по сравнению с эталоном, в качестве которого применяется раствор соли радия с содержанием от 10^{-10} до 10^{-8} г радия, помещаемый в так называемый барбатер. Количество накапливающегося в барбатере радона связано определенной зависимостью с количеством радия и временем, в течение которого происходит накопление радона. Чувствительность определения радона исключительно высока: до 10^{-15} кюри (кюри — количество радона, которое находится в равновесии с 1 г радия).

В последние годы для целей поисков используются: изотопный состав элементов, воздействие нейтронов на горные породы и т. д. Изотопный состав элементов определяется на масспектрографах. Воздействие нейтронов на горные породы используется при нейтронном каротаже: с этой целью в буровую скважину опускают генератор быстрых нейтронов и детектор γ -излучения. По характеру и интенсивности вторичного излучения судят об элементах и их концентрации на пути быстрых нейтронов.

Таковы принципы некоторых методов анализа, применяемых при геохимических поисковых работах. Эти методы все более совершенствуются, чувствительность и точность определений повышается, растет производительность полевых и стационарных лабораторий, снижается стоимость анализов. Все это представляет большое значение для совершенствования и самих геохимических поисков, включающих в себя, как одну из важнейших неотъемлемых частей, аналитические методы.

Глава 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОИСКОВ

Поисковые критерии и поисковые признаки

Образование месторождений полезных ископаемых происходит в результате геохимических процессов, протекающих в тех или иных геологических условиях. Определенным условиям отвечают определенные группы месторождений полезных ископаемых. Поэтому выявление геологических и геохимических факторов, осуществляемое при геологическом картировании той или иной территории или при поисках месторождений, является основной и важнейшей частью поисковых работ; совокупность этих геологических и геохимических факторов позволяет с достаточной определенностью судить о возможности образования на данной территории тех или иных групп месторождений полезных ископаемых.

Геологические и геохимические факторы, определяющие условия нахождения месторождений в земной коре, носят название поисковых критериев. Поисковые критерии являются, таким образом, геологическими и геохимическими предпосылками поисков месторождений полезных ископаемых.

Поисковые критерии весьма разнообразны, их можно объединить в несколько групп. Обычно выделяют факторы: магматогенные, структурные, стратиграфические, литологические, геоморфологические и собственно геохимические. Значение тех или иных факторов весьма неравноценно при поисках определенных групп месторождений; например, при поисках эндогенных месторождений особенно большую роль играют магматогенные и структурные критерии; при поисках осадоч-

ных месторождений на первый план выдвигаются литологические и стратиграфические критерии; для поисков вторичных месторождений (например, россыпей) доминирующую роль играют геоморфологические факторы. Геохимические критерии играют большую роль при поисках всех месторождений полезных ископаемых, поскольку любое месторождение образуется при тех или иных геохимических процессах. Строго говоря, в скрытой форме геохимические факторы являются составной частью и всех перечисленных геологических критериев: во всех случаях как эндогенных, так и осадочных и метаморфогенных месторождений, мы всегда имеем дело с миграцией химических элементов, но осуществляемой в разных формах в зависимости от геологических условий.

Помимо положительных поисковых критериев, т. е. факторов, определяющих условия нахождения месторождений в земной коре и возможность наличия их на данной территории, можно выделять и отрицательные поисковые критерии, т. е. такие геологические и геохимические факторы, которые будут исключать возможность образования тех или иных месторождений и их групп на той или иной территории. Например, отсутствие на изучаемой территории осадочных горных пород предопределяет и отсутствие на ней месторождений осадочного генезиса; наличие лишь осадочных пород при полном отсутствии изверженных будет указывать на отсутствие магматогенных месторождений; наличие лишь кислых изверженных пород указывает на отсутствие магматогенных месторождений, связанных с основными и ультраосновными породами и т. д. Отрицательные поисковые критерии пока мало разработаны и систематизированы, хотя они имеют подчас не меньшее значение, чем и положительные критерии, так как позволяют при прогнозировании тех или иных территорий на те или иные полезные ископаемые отбраковывать отдельные части этих территорий и тем самым экономить значительные силы и средства. Этот важный вопрос требует специального большого внимания со стороны теоретиков и практиков поискового дела.

При проведении поисковых работ помимо поисковых критериев необходимо принимать во внимание также поисковые признаки, т. е. любые конкретные факты, указывающие на присутствие тех или иных месторождений полезных ископаемых. Поисковые признаки могут быть прямыми и косвенными.

К прямым поисковым признакам относятся: а) рудные выходы, б) ореолы рассеяния элементов и минера-

лов, слагающих месторождения, в) остатки рудных минералов в производившихся ранее горных выработках и отвалах. Косвенными поисковыми признаками являются: а) околорудные измененные породы, б) минералы-индикаторы, ассоциирующие с рудными минералами, в) элементы-индикаторы, г) растения-индикаторы, д) геоморфологические признаки, е) археологические находки, ж) названия мест. Кроме того, поисковыми признаками являются различные геофизические аномалии, которые иногда могут быть прямыми поисковыми признаками (например, интенсивные магнитные аномалии для магнетитовых залежей или радиометрические аномалии для радиоактивных руд), иногда — косвенными (например, электрические аномалии для сульфидных месторождений).

Различные геологические поисковые критерии и признаки подробно рассматриваются в соответствующих курсах поисков и разведок месторождений полезных ископаемых. Поэтому в дальнейшем мы остановимся в основном на геохимических показателях, но будем рассматривать их в связи с теми критериями и признаками, которые хотя к собственно геохимическим формально и не относятся, но тесно с ними связаны. Особое значение для геохимических поисков имеют геохимические индикаторы, ореолы и потоки рассеяния элементов.

Геохимические индикаторы

Химические элементы полезных ископаемых, в той или иной форме и в соответствующих концентрациях достигающие земной поверхности и позволяющие судить о залегающих на глубине месторождениях, с которыми они генетически связаны, можно называть геохимическими индикаторами (указателями) этих глубинных месторождений.

Геохимические индикаторы могут быть двух типов. Во-первых, это те элементы или их соединения, которые непосредственно слагают полезное ископаемое (например, касситерит в механических ореолах рассеяния около оловянных месторождений, медь в водных ореолах в связи с медными месторождениями и т. д.). Эти индикаторы можно называть прямыми, так как они непосредственно позволяют судить о составе руд месторождения, ореолы которого удалось выявить.

Вторую группу составляют элементы, являющиеся спутниками полезных компонентов. Здесь связи между спутниками и основными компонентами залежи могут быть как генетиче-

скими, так и парагенетическими. Эти индикаторы можно называть косвенными. Примерами их могут служить: молибден в водных ореолах рассеяния сколо медных месторождений, ртуть в первичных ореолах рассеяния около сурьмяных и полиметаллических месторождений, эманация радия над урановыми месторождениями и т. д.

Роль прямых геохимических индикаторов ясна и не нуждается в дополнительных разъяснениях. Эти элементы-индикаторы в первичных ореолах присутствуют обычно в тех же минеральных формах, как и в самих месторождениях; в данном случае можно говорить, наряду с элементами-индикаторами, также и о минералах-индикаторах. То же самое относится и к механическим ореолам рассеяния, которые хотя и являются вторичными, но содержат искомые элементы в своей главной массе в форме тех же минералов, как и сами коренные месторождения. Типичными примерами их могут служить шлихи, которые уже очень давно используются при поисках коренных месторождений касситерита, шеелита, золота, платины, киновари и многих других полезных ископаемых.

В водных ореолах рассеяния формы нахождения элементов-индикаторов, очевидно, отличаются от их форм в месторождениях: это будут разнообразные растворимые соединения указанных элементов (сульфаты, хлориды, карбонаты и т. д.), более или менее диссоциированные на простые и комплексные ионы. Совершенно отличны по форме нахождения будут также элементы-индикаторы в биогеохимических ореолах: в растительных и животных организмах они присутствуют в виде разнообразных органических соединений, существенно не похожих на те минералы, в которых они находятся в месторождениях. В газовых ореолах, создающихся над газовыми залежами, элементы-индикаторы находятся, очевидно, в форме тех же летучих соединений, что и в самой залежи (например, летучие углеводороды в связи с месторождениями горючих газов; гелий над скоплениями гелия и т. д.).

Косвенные индикаторы, как следует из самого определения этого понятия, можно разделить на две группы в соответствии с теми взаимоотношениями, которые существуют между ними и основными элементами, слагающими месторождения. К первой группе мы можем отнести такие элементы-индикаторы или их соединения, которые с основными искомыми элементами связаны явно генетически, являются их производными. Таковы, например, радий и радон для урановых месторождений, торон для месторождений тория, гелий

для тех и других месторождений, метан, этан, пропан и другие углеводороды для нефтяных залежей, сульфат-ион для сульфидных месторождений и т. д.

Связи индикаторов этой группы с основными элементами или соединениями месторождений настолько тесные, что заключения, которые мы можем делать на основании этих косвенных индикаторов, в смысле достоверности почти не уступают заключениям, которые делаются по прямым индикаторам, что имеет большое не только теоретическое, но и практическое значение и широко используется при поисках некоторых видов важнейших полезных ископаемых (например, урана путем эманационной съемки, нефти посредством газовой съемки с использованием углеводородов и т. д.).

Элементы и соединения указанной группы косвенных индикаторов связаны с основными элементами и соединениями месторождений двумя принципиально отличными способами. Одни из них являются продуктами внутриядерных превращений этих элементов (гелий, радий, радон, торон и т. д.), другие — химических реакций (например, окисление сульфидов в сульфаты) или физико-химических превращений (например, дробная перегонка углеводородов нефти и т. д.).

Иногда эти связи становятся еще более сложными. Так, выделяющиеся из нефтяных залежей углеводороды на своем пути к земной поверхности в результате процессов окисления и полимеризации превращаются в битумы, образуя характерные битумные ореолы и потоки рассеяния, также широко используемые при геохимических поисках (битумная съемка и битумный каротаж). Часто эти битумы и сами углеводороды являются питательной средой для соответствующих специфических микроорганизмов, которые в данном случае также могут рассматриваться как своеобразные индикаторы на нефтяные месторождения, хотя здесь связи между ними и нефтяными залежами, оставаясь генетическими, являются в то же время достаточно сложными, многоэтапными (нефть—газы—битумы—микроорганизмы), обязанными своим происхождением разным физико-химическим и биологическим процессам.

Парагенезисы элементов и их причины

До сих пор мы говорили о генетических связях индикаторов с месторождениями. Но эти связи могут быть также парагенетическими, обусловленными совместным нахождением основных ценных компонентов и их косвенных индикаторов в пределах одного и того же месторождения. Здесь задачи по-

исков полезных ископаемых теснейшим образом связываются с учением о парагенезисе химических элементов, которое по существу может рассматриваться наряду с учением о миграции химических элементов теоретической основой геохимических методов поисков.

Первоначально термин «парагенезис» относился лишь к минералам. Он был введен в науку впервые в 1849 г. Брейтгауптом, хотя В. М. Севергин еще в 1798 г. достаточно четко сформулировал смысл этого важного для минералогии понятия, обозначив его русским словом «смежность минералов». Под «смежностью минералов» В. М. Севергин понимал «совокупное пребывание двух или многих минералов в каком-либо месте, которое заслуживает особого примечания». Рассматривая этот вопрос в своей книге «Первые основания минералогии или естественной истории ископаемых тел», он писал: «Усовершенствование таковых замечаний, какая порода, при каких обстоятельствах, какие тела и в каком виде наиболее содержит, облегчило бы самое приискивание руд и цветных камней».

Идея о совместном, закономерном нахождении минералов появилась вначале как итог отдельных эмпирических обобщений многочисленных фактов, полученных при многовековой коллективной работе первых искателей руд; она помогала им разыскивать металлы и драгоценные камни, а впоследствии и многие другие необходимые человеку полезные ископаемые. В работах Севергина, Брейтгаупта и других более поздних исследователей эта идея получила научную интерпретацию и дальнейшее развитие. В настоящее время наука располагает многочисленными фактами, иллюстрирующими учение о парагенезисе минералов; эти факты обобщены и в значительной мере научно объяснены в известных монографиях по минералогии, геохимии, петрографии и минеральным месторождениям.

Понятие о парагенезисе элементов зародилось значительно позднее, в связи с успехами химии, после того как был детально выяснен состав минералов. Впервые понятие о парагенезисе элементов было введено в науку В. И. Вернадским в 1909 г. и в настоящее время считается одним из наиболее разработанных и важных разделов современной геохимии.

Парагенезис минералов включает и парагенезис элементов, слагающих эти минералы, однако последнее понятие значительно шире первого, так как охватывает ассоциации элементов не только в твердых фазах земной коры — в минералах, горных породах и рудах, но также в природных во-

дах, атмосферах, в растительных и животных организмах. Ассоциации элементов в природных объектах могут быть разделены на две большие группы: 1) ассоциация элементов в состоянии рассеяния, 2) ассоциации элементов, образующих концентрации. В состоянии рассеяния встречаются по существу все известные элементы. Для литосферы, гидросферы и биосферы элементы в этом состоянии образуют качественно единую ассоциацию: тончайшими анализами в любой части этих геосфер — в любом минерале, породе, природной воде или организме — практически можно обнаружить наличие всех элементов таблицы Менделеева за исключением, очевидно, тех, которые в естественных условиях не встречаются, а получены искусственно (трансурановые элементы и немногие другие). Понятно, что эта ассоциация элементов в состоянии рассеяния для указанных выше целей (поисков месторождений полезных ископаемых на основе использования элементов-индикаторов) служить не может: мы во всех случаях будем получать качественно одни и те же результаты, длинный список всегда одних и тех же обнаруженных элементов.

Для поисков могут быть использованы лишь те ассоциации элементов, которые характерны для их концентраций, поскольку лишь с ними могут быть связаны ореолы и потоки рассеяния элементов, характеризующиеся повышенными, аномальными содержаниями как самих искоемых элементов, так и их спутников-индикаторов. Ассоциации элементов в состоянии концентрации в отличие от единой по существу ассоциации элементов в состоянии рассеяния довольно разнообразны как качественно, так и количественно: они характеризуются сочетаниями различных элементов и различными их концентрациями, всегда более высокими, чем натуральный фон для данной местности или кларки для земной коры в целом.

В свете рассматриваемой основной задачи — геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых — ассоциации элементов в состоянии концентрации, интересующие нас, мы практически должны ограничить понятием месторождений соответствующих химических элементов, с присутствиями им обычно достаточно высокими кларками их концентраций, а также связанными с ними ореолами.

Причины ассоциаций элементов в состоянии концентрации довольно разнообразны. Все они связаны со свойствами элементов, проявляющимися в конкретной физико-химической обстановке земной коры, и могут быть сведены в две принципиально отличные группы. Одни из этих причин связаны с миграцией атомов, т. е. определяются свойствами внешних

электронных слоев атомов; другие связаны с внутриядерными превращениями и, следовательно, зависят от устойчивости ядер атомов.

Свойства элементов определяются положением их в Менделеевской таблице. Элементы, соседние по своему положению в развернутой периодической таблице в пределах определенных ее полей, близки по своим химическим и физическим свойствам и в ряде важнейших случаев мигрируют совместно, образуя в природных условиях соответствующие достаточно обширные ассоциации. А. Н. Заварицкий во «Введении в петрохимию» в 1944 г. писал: «Таблица наглядно выражает, таким образом, основной геохимический закон, ставший теперь почти аксиомой, который можно формулировать так: нахождение химических элементов в земной коре зависит от строения атомов этих элементов».

Существующие геохимические классификации элементов в основном базируются на этом законе. Так, А. Е. Ферсман в пределах развернутой Менделеевской таблицы выделяет три поля элементов: а) поле обычное, представленное наиболее распространенными элементами горных пород (O, Si, Al, K, Na и др.); б) поле сульфидное, включающее характерные элементы гидротермальных месторождений (Cu, Zn, S, As, Sn и др.); в) поле элементов, типичных для остаточной кислой магмы и гранитных пегматитов (Zr, Nb, Ta, U, Th и др.). А. Н. Заварицкий выделил в пределах периодической таблицы 10 блоков, объединяющих элементы с близкими свойствами: 1) благородные газы, 2) элементы горных пород, 3) магматические эманации, 4) группу железа, 5) редкие элементы, 6) радиоактивные элементы, 7) металлические рудные, 8) металлоидные и металлогенные, 9) элементы группы платины, 10) тяжелые галоиды.

Но помимо указанного основного геохимического закона, определяющего генеральные линии в распределении химических элементов на Земле вообще и в земной коре в частности и приводящего к образованию указанных ассоциаций элементов, на их распределение оказывают влияние и некоторые другие причины, совокупное воздействие которых приводит к значительным отклонениям от того, что следовало бы ожидать, если бы распределение элементов подчинялось только указанному закону. Поэтому наблюдаемые в природе реальные ассоциации элементов в состоянии концентрации обычно более узки, чем намечаемые полями и блоками периодической таблицы. Так, например, в природе мы никогда практически не встречаем в тесной ассоциации всех элемен-

тов гидротермальных или пегматитовых месторождений, а лишь те из них, которые характерны для определенных типов этих месторождений. Но известны и обратные случаи, когда природные ассоциации элементов являются более широкими, чем указанные блоки периодической таблицы. Например, в гидросфере в значительных концентрациях встречаются, с одной стороны, Na, Mg, K, т. е. элементы горных пород, с другой стороны, Cl и S, т. е. элементы магматических эманаций. Радиоактивные элементы никогда не встречаются без элементов других групп, обычно ассоциируясь то с редкими элементами, то с металлическими рудными и т. д.

Наложение одних геохимических ассоциаций на другие является, как известно, довольно обычным природным явлением. Это объясняется тем, что наряду с основным законом геохимии, определяющим распространение химических элементов, действуют и другие законы, управляющие миграцией элементов. Пути их миграции определяются, как известно, с одной стороны, свойствами самих элементов, т. е. внутренними факторами миграции, с другой стороны, на них оказывают существенное влияние внешние физико-химические и биологические условия (т. е. внешние факторы миграции).

Элементы и их соединения, близкие по миграционным свойствам, в конкретных геохимических условиях земной коры могут совместно и концентрироваться. Важнейшими свойствами элементов и их соединений, близость которых особенно влияет на возможность образования ассоциаций элементов, являются: а) растворимость, б) удельный вес, в) величина энергии кристаллических решеток минералов, г) упругость паров. Особенно большую роль играет растворимость элементов и их соединений в твердом, жидком и газообразном состоянии. Способность элементов давать твердые растворы — изоморфные смеси — имеет при этом выдающееся значение с точки зрения рассматриваемой проблемы элементов-индикаторов. Здесь на первое место выступает близость радиусов ионов или атомов элементов. Таким образом формируются многочисленные ассоциации элементов, связанных общностью кристаллических решеток, близостью размеров радиусов ионов и атомов и близостью поляризационных свойств.

При разрушении кристаллических решеток минералов под влиянием ряда причин (понижение температуры, изменение валентности при изменившемся окислительно-восстановительном режиме и т. д.) происходит распад изоморфных смесей и наступает новый этап в миграции элементов, причем каждый элемент, строго говоря, может рассматриваться как своеобраз-

разный индикатор на другие элементы, которые были с ним связаны по законам изоморфизма в узлах кристаллических решеток минералов, в том числе слагающих месторождения. Например, кадмий может рассматриваться как индикатор на сфалерит, рений — на молибденит, серебро — на свинец и т. д.

Растворимостью различных соединений в воде объясняется парагенезис элементов в гидросфере. Этот парагенезис для главной массы природных вод — для океанов и морей — отличается большим постоянством, что объясняется высокой подвижностью как самого растворителя — воды, так и растворенных в ней элементов. В этом существенное отличие водных растворов гидросферы от твердых растворов литосферы, где в изоморфных смесях количественные соотношения элементов изменяются в весьма широких пределах как для одного и того же минерала, но взятого из разных мест, так и при переходе от одного минерала к другому.

Теснейшим образом с парагенезисом гидросферы связаны парагенезисы элементов в осадках, образовавшихся за счет элементов гидросферы; таковы ассоциации галогенных отложений натрия, магния, калия, сульфат-иона и т. д. В изолированных водоемах в случае значительной метаморфизации растворов гидросферы в результате влияния окружающих пород парагенезисы элементов иногда могут существенно отличаться от упомянутой ассоциации гидросферы; в них иногда в значительных концентрациях накапливаются такие элементы, как бор, бром, литий и некоторые другие.

При образовании парагенезисов гидротермальных месторождений также большую роль играет растворимость соединений элементов. Это можно считать доказанным для горячих щелочных сероводородных вод: они, как известно, хорошо растворяют сульфиды таких элементов, как ртуть, сурьма и мышьяк, которые находятся в них в форме комплексных соединений типа $MeS \cdot nNa_2S$. Разлагаясь при нейтрализации растворов или при их окислении, эти комплексные соединения дают хорошо известные парагенезисы сульфидов указанных элементов, характерные для эпитеpmальных месторождений. Той же причиной, т. е. хорошей растворимостью в щелочных сульфидных растворах кремнезема, бикарбоната кальция и фторида натрия, легко объяснить парагенезис с указанными сульфидами также кварца, кальцита и флюорита, обычных жильных минералов низкотемпературных гидротермальных месторождений. Возможно той же причиной объясняются некоторые парагенезисы и других халькофильных элементов, отлагающихся в рудных гидротермальных месторождениях.

Большую роль в переносе и отложении ряда элементов гидротермальных месторождений могут играть помимо упомянутых щелочных сульфидных растворов также хлоридные, бикарбонатные и некоторые другие растворы, где перенос элементов может осуществляться как в форме простых, так и комплексных ионов. Так, для шестивалентного урана в щелочных растворах Г. Б. Наумов и другие исследователи допускают перенос в форме по крайней мере двух комплексов: трикарбонатурана $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ и диаквадикарбонатурана $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2-}$. Известны различные комплексы и для других элементов, в форме которых они также могут переноситься в природных условиях.

В случае твердых и жидких растворов растворимость элементов ограничена определенными пределами, зависящими от характера растворителя и растворенного вещества, от температуры, рН раствора и других причин. У газов взаимная растворимость не ограничена. Поэтому возможны по существу любые ассоциации газообразных веществ с любыми соотношениями компонентов при условии, конечно, что эти газы при этом химически не взаимодействуют. Наряду с единой ассоциацией газов в надземной атмосфере, состоящей в основном из азота, кислорода, углекислого газа, аргона и других, притом всегда в почти постоянных отношениях, мы имеем большое число своеобразных подземных атмосфер, характеризующихся своими ассоциациями газов, что связано с их происхождением (биохимическим, химическим, воздушным, радиоактивным или смешанным).

Эти ассоциации сохраняются лишь в случае их изоляции от тропосферы, а также от других подземных атмосфер. Если это условие не соблюдается, газы стремятся занять весь предоставленный им объем, взаимно неограниченно смешиваясь. Однако некоторые процессы все же ведут к разделению газов; такими процессами являются в первую очередь различная растворимость газов в природных растворах, различная скорость диффузии газов через горные породы и воды и различная химическая активность по отношению к окружающим породам и минералам. Поэтому, например, ассоциация из водорода и кислорода, образующаяся при высоких температурах за счет диссоциации воды, относительно быстро теряет кислород, идущий на многочисленные реакции окисления; остается водород, который легко диффундирует в верхние горизонты литосферы, иногда образуя здесь подземные атмосферы с содержанием упомянутого газа в десятки процентов от состава этих атмосфер.

Большое значение для образования ассоциаций элементов имеют удельные веса элементов и их соединений, а также связанные с ними атомные объемы. Разделение элементов по удельным весам и атомным объемам в гравитационном поле Земли является хорошо установленным и легко наблюдаемым фактом. Под влиянием силы тяжести, односторонне направленной к центру Земли во все времена ее истории, произошло разделение веществ по агрегатному состоянию между атмосферой, гидросферой и литосферой.

В основе широко распространенной теории В. М. Гольдшмидта о первичном разделении вещества Земли на сидерофильное ядро, халькофильную переходную зону, литосферу и атмосферу лежит, как известно, представление об атомных объемах, близких у элементов каждой из этих геосфер, но существенно отличных для разных геосфер. Удельные веса минералов играют большую роль при дифференциации магм и образовании осадочных пород; исключительно велика роль удельных весов при разделении трудно- и легколетучих соединений в пневматолитовых и связанных с ними скарновых и гидротермальных процессах.

Как показал А. Е. Ферсман, многие ассоциации элементов можно объяснить с точки зрения предложенной им геоэнергетической теории. Согласно этой теории, при кристаллизации расплавов и растворов в результате понижения температуры происходит высвобождение свободной энергии, которое примерно эквивалентно энергии кристаллических решеток образующихся минералов. Время, а следовательно, и место выпадения того или иного минерала, согласно теории парагена, в основном определяются энергией кристаллической решетки, откуда следует, что минералы с близкими значениями энергии решеток (точнее, с близкими величинами парагенов) выпадают примерно в одно и то же время, следовательно, близко в пространстве, т. е. образуют соответствующие ассоциации. Таким путем, по Ферсману, можно объяснить многочисленные парагенезисы минералов, а следовательно, и слагающих их элементов. Конечно, в действительности дело происходит значительно сложнее: помимо величины энергии решеток следует учитывать концентрации элементов в исходных расплавах и растворах, форму их нахождения в них (ионы, молекулы и т. д.) и некоторые другие моменты, однако важная роль энергетики при этом, безусловно, имеет место.

Во многих случаях ассоциации элементов естественнее всего объяснять упругостью паров соединений, их летучестью.

Надземная и многочисленные подземные атмосферы, как уже указывалось, являются яркими примерами подобных ассоциаций газообразных при обычных температурах веществ. При повышении температуры упругость паров элементов и их соединений закономерно возрастает: при достаточно высоких температурах, что имеет место на некоторой глубине от земной поверхности, переходят в газообразное состояние многие соединения, которые при обычных условиях являются твердыми или жидкими телами. Если при этом упругость паров этих соединений становится выше, чем внешнее давление, отвечающее данным глубинам, происходит отделение летучих погоннов от менее летучего остатка, поскольку их физические свойства, в первую очередь удельные веса и агрегатное состояние, существенно отличаются. Так образуются ассоциации из газов H_2O , CO_2 , многочисленных хлоридов, фторидов и других летучих соединений элементов, фиксирующихся затем при соответствующих условиях в форме тех или иных пневматолитовых, скарновых и гидротермальных минералов.

Рассмотренные выше причины образования ассоциаций элементов, в том числе в довольно высоких концентрациях, связаны с близостью тех или иных свойств элементов и их соединений (близкое положение в менделеевской таблице и в связи с этим близость химических и физических свойств, высокая растворимость в твердой, жидкой и газообразной фазах, близость удельных весов и атомных объемов, близость энергетических констант кристаллических решеток, высокая упругость паров).

Однако ассоциации элементов во многих случаях могут объясняться и различием их свойств. Таковы все соединения металлов с металлоидами, катионов с анионами, т. е. по существу все минералы, кроме самородных элементов, и все остальные встречающиеся на Земле соединения элементов как неорганического, так и органического происхождения, начиная с бинарных и кончая сложнейшими многокомпонентными соединениями. Все эти многочисленные и самые разнообразные ассоциации элементов объясняются химическим их родством, в основе которого лежит взаимодействие разноименно заряженных катионов и анионов.

Различием знака электрических зарядов объясняются и разнообразные ассоциации элементов, наблюдающиеся в высокодисперсных коллоидальных системах, способных сорбировать в зависимости от их заряда то разнообразные катионы, то анионы. Таковы, например, осадочные марганцевые руды, часто обогащенные путем сорбции барием, никелем,

кобальтом, медью и другими металлами; осадочные руды железа, концентрирующие фосфор, ванадий, мышьяк и другие отрицательные анионы; почвы, обогащенные калием, фосфором, азотом и т. д.

Минералы из растворов или расплавов могут выпасть, естественно, лишь в том случае, когда концентрация соединений, отвечающих минералу, будет выше, чем их растворимость при данных условиях. Поэтому для того чтобы из данной жидкой фазы одновременно или близко по времени выпали два или больше минерала, необходимо, чтобы относительные концентрации их компонентов в растворе или расплаве отвечали пределу растворимости этих минералов в данной ассоциации. При этом условии минералы будут кристаллизоваться совместно, образуя соответствующие природные ассоциации, примером которых могут служить эвтектические смеси минералов (письменные структуры из полевого шпата и кварца в гранитных пегматитах и др.). Значение этого важного фактора для образования минеральных месторождений достаточно хорошо выяснено физической химией. Особенно много сделано в этом отношении для объяснения парагенезисов минералов, выпадающих из природных солевых растворов; исключительное значение при этом имели работы Вант-Гоффа и Н. С. Курнакова и его школы.

До сих пор мы рассматривали причины ассоциаций химических элементов в неорганических природных объектах. Большое число интересных и важных ассоциаций элементов дают также природные биогенные объекты, своим происхождением обязанные причинам особого рода, связанным с жизнедеятельностью организмов.

Как выяснено исследованиями В. И. Вернадского, А. П. Виноградова и других советских и зарубежных ученых, химический состав является характерным видовым признаком организмов, причем различия между организмами особенно четко идут по линии микроэлементов. Во всех организмах концентрируются кислород, водород, углерод, азот, сера, фосфор, калий и железо, физиологическая роль которых достаточно хорошо выяснена. Во многих организмах важную физиологическую роль играют также кальций, кремний, иод, марганец, медь и некоторые другие элементы, которые также концентрируются в них в значительных количествах. Наряду с указанными элементами в растения вместе с почвенными растворами поступают в тех или иных количествах и многие другие элементы, физиологическая роль которых пока не ясна или только что начинает выясняться. Чрезвычайно важно, что

между содержанием элементов в почвах и в произрастающих на них растениях существует достаточно четкая корреляция, что особенно хорошо было показано А. П. Виноградовым и его сотрудниками для большого числа редких и рассеянных элементов. Это положение является теоретической основой биогеохимического метода поисков месторождений полезных ископаемых.

В живых организмах и в продуктах их разложения (в нефтях, углях, торфах, сапропелях и т. д.) в результате биогеохимических, сорбционных и других процессов образуются сложные многокомпонентные ассоциации элементов, которые качественно существенно отличаются от ассоциаций, связанных с неорганическими процессами. Так, например, давно установлено, что в золе каменных углей присутствуют иногда в значительных количествах помимо таких широко распространенных элементов, как кремний, алюминий, калий и другие, также элементы, характерные для протокристаллизации (никель, кобальт), остаточной кристаллизации (бериллий, бор, уран и др.) и гидротермального процесса (свинец, цинк, молибден и др.). Подобных ассоциаций элементов для неорганических процессов мы не знаем.

Мы рассмотрели важнейшие причины образования ассоциаций элементов, связанных, в конечном счете, с перераспределением в результате миграции уже существующих атомов. Но некоторые ассоциации элементов образуются в результате принципиально особых причин, связанных с превращениями самих элементов. В настоящее время с исчерпывающей полнотой эти превращения изучены у сильно радиоактивных элементов — урана, радия, тория и актиния. Менее изучены превращения трансурановых элементов, а также слаборадиоактивных — калия, рубидия, самария и др. Атомы этих элементов, самопроизвольно распадаясь, дают ряд неустойчивых полупродуктов и, в конечном счете, превращаются в стабильные изотопы (уран и торий — в урановый и ториевый свинец и гелий, калий — в аргон, рубидий — в стронций и т. д.). Количество конечных продуктов радиоактивного распада с течением времени все более и более возрастает и для очень древних минералов становится довольно значительным. На этом явлении основаны методы определения абсолютного возраста минералов и горных пород (свинцовый, гелиевый, калий-аргоновый, рубидиево-стронциевый).

В результате указанных процессов образуются некоторые интересные ассоциации элементов, в том числе: уран — урановый свинец и гелий; торий — ториевый свинец и гелий;

калий—аргон и другие широко используемые в настоящее время для определения абсолютного возраста минералов. Совершенно очевидно, что конечные продукты могут также использоваться в качестве геохимических индикаторов при поисках месторождений урана, тория и калия. Особенно в этом отношении заманчив гелий с его химической инертностью и высокой миграционной способностью.

В качестве поисковых индикаторов большой интерес представляют и некоторые полупродукты распада радиоактивных элементов, которые хотя и встречаются всегда в очень небольших концентрациях, что обусловлено их относительно слабой устойчивостью и поэтому малой продолжительностью жизни, но являются сильно активными и потому могут быть легко обнаружены современными очень чувствительными методами радиометрического анализа. Из этих полупродуктов распада уже давно и с большой эффективностью при поисках урановых руд используется в качестве элемента-индикатора радий и особенно его эманация—радон (радиометрическая съемка, эманационная съемка). Эманационная съемка является одним из важных методов при поисках урановых руд.

Дальность распространения радиоактивных газов в результате диффузии связана с их устойчивостью; она пропорциональна квадратному корню из периода полураспада. В соответствии с этим другие эманации—торон и актинон, обладающие малыми периодами полураспада, успевают диффундировать на меньшие расстояния, чем радон; поэтому, как показывают теория и опыт, глубинность тороновой съемки составляет менее 10 см, а актиноновой—лишь 2—3 см, вследствие чего использование торона и актинона для поисковых целей является мало эффективным.

Выше мы рассмотрели важнейшие причины образования ассоциаций элементов, связанные с их свойствами. В конкретных геологических условиях земной коры образующиеся ассоциации являются результатом одновременного действия целого ряда указанных причин, причем роль каждой из них может быть в тех или иных условиях решающей или второстепенной. Перечисленные причины ассоциаций элементов теснейшим образом связаны с их миграцией, ассоциации элементов являются результатом генезиса тех геологических объектов, для которых они характерны. Поэтому проблема образования ассоциаций элементов в конечном счете является проблемой образования разнообразных изверженных и осадочных пород, минералов и руд, природных растворов, надземных и подземных атмосфер, эволюции организмов и т. д.

Она, таким образом, чрезвычайно обширна и сложна, и ее решение теснейшим образом связано с решением основных проблем других наук, в первую очередь петрографии, минералогии, учения о полезных ископаемых, гидрогеологии, почвоведения и т. д.

Бесспорна связь ассоциаций химических элементов с теми или иными типами кристаллических горных пород. В результате сложных, не совсем еще вскрытых современной наукой, процессов дифференциации магмы происходит образование интрузивных и эффузивных горных пород, каждая из которых может рассматриваться как своеобразная ассоциация многих химических элементов, находящихся в достаточно высоких концентрациях, возникающая на фоне элементов в состоянии рассеяния. Все горные породы отличаются прежде всего содержанием главных породообразующих элементов, таких, как кислород, кремний, алюминий, железо, кальций, магний, натрий, калий и др. Различия в содержании этих элементов колеблются в разных пределах. Например, содержание кремнезема от 80% (для аплитов) до 38% (для дунитов); содержание окиси магния в тех же породах соответственно составляет: следы (для аплитов) и 41% (для дунитов). Что касается других, особенно аксессуарных второстепенных элементов, то содержание их, как известно, варьирует еще более значительно.

А. Е. Ферсман, характеризуя магматический процесс, выделил в нем породы протокристаллизации, мезокристаллизации и телокристаллизации; каждый из этих типов характеризуется свойственными ему ассоциациями ведущих и главных элементов. Для пород протокристаллизации (т. е. образовавшихся из ультраосновных магм — дунитов, пироксенитов и аналогичных образований) такими элементами будут: Mg, Si, Ti, Fe, Ni, Cr, S, O, P, S, Ca, V, группа платины и т. д. Для конечных продуктов дифференциации — гранитных магм — характерными элементами являются: H, Li, Be, B, O, Si, Na, Al, K, Rb, Cs, TR, F, P и др. Что касается халькофильных и редких элементов, то на основании имеющихся данных уже давно отмечена связь: с гранитной магмой — Sn, W, As, Bi, Mo, B, F, U, Th, TR и некоторых других; с базальтовой магмой — Cr, Ti, Pt-группы, S, V, Ni, Co и т. д.

Как следствие из разбора накопившихся эмпирических данных А. Е. Ферсман сформулировал следующее важное для целей поисков положение: «Тип горной породы предопределяет концентрации определенных химических элементов, причем наблюдается зависимость между характерными ассо-

циациями элементов и химизмом породы, ее основными структурными чертами и особенностями остывания (глубиной очагов)»¹.

В связи с проблемой поисков месторождений полезных ископаемых особое значение приобретает вопрос о связи этих месторождений с теми или иными типами горных пород. По этому вопросу имеется, как известно, большая литература, в которой обобщены многочисленные эмпирические факты. С точки зрения степени доказанности генетической связи месторождений с интрузиями можно в настоящее время выделить три главные группы.

1. Месторождения, для которых генетическая связь с интрузиями доказывается бесспорно. Сюда относятся месторождения хромитов, титано-магнетитов, платины и элементов ее группы, медно-никелевых, сульфидных и других руд, связанных с определенными основными и ультраосновными интрузиями; месторождения пегматитов с их разнообразными редкими элементами, связанные с гранитными и щелочными интрузиями; месторождения фосфора, циркония, ниобия и редких земель, связанные с конкретными щелочными породами и т. д.

2. Месторождения, связь которых с определенными типами интрузий ясна, но не может быть однозначно решен вопрос о связи месторождений с конкретными представителями интрузий этого типа. Другими словами, здесь между породами и месторождениями существуют не генетические, а парагенетические связи: те и другие генетически связаны с общим магматическим очагом и парагенетически — друг с другом. Сюда могут быть отнесены многочисленные месторождения оловоносных грейзенов, кварцево-касситеритовых, кварцево-вольфрамитовых и многих других высокотемпературных жил, связанных с гранитоидными интрузиями, а также контактовые месторождения железа, вольфрама, молибдена и некоторых других элементов.

3. Месторождения, связь которых с интрузиями не ясна и, может быть, во многих случаях вообще отсутствует. Таковы многочисленные так называемые мезотермальные месторождения полиметаллических и других руд в известняках и эффузивах, а особенно месторождения эпитермального генезиса, характерные для ртути, сурьмы и некоторых других элементов.

¹ А. Е. Ферсман. Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых, 1940, стр. 99.

В связи с рассматриваемым вопросом уместно сделать некоторые замечания, относящиеся к группе гидротермальных месторождений. Термин «гидротерма» буквально обозначает «нагретая вода», следовательно, гидротермальные растворы и гидротермальные месторождения соответственно будут обозначать горячие водные растворы и месторождения, которые из них образовались. В самом термине «гидротермальный» нет указания на происхождение растворов. Тем не менее в научной, учебной и справочной литературе обычно, когда говорят о гидротермальных растворах, подразумевают растворы, генетически связанные с магматическими очагами, и соответственно все гидротермальные месторождения рассматривают как магматогенные. Отсюда делаются соответствующие практические выводы для поисков подобных месторождений.

Основаниями для отнесения всех гидротермальных месторождений в категорию магматогенных обычно выдвигаются их вещественный состав и жильная форма рудных тел, иногда близость тех или иных изверженных пород. Принимается, что элементы рудных минералов и большая часть элементов жильных минералов были привнесены из магматического очага. В настоящее время можно привести многочисленные примеры безусловно гидротермальных, т. е. образовавшихся из горячих растворов месторождений, которые с магматической деятельностью никак не связаны, так как в районе этих месторождений никаких проявлений магматизма или вообще не обнаруживается или, если они и есть, то нет никаких оснований связывать с ними генезис указанных месторождений. Таковы, например, многочисленные ртутные, сурьмяные, полиметаллические и многие другие телетермальные месторождения.

Что касается рудных и жильных минералов, то, как это доказано сейчас многочисленными фактами, они также могут образовываться вне всякой связи с магматической деятельностью. Так, Л. В. Пустовалов в работе «Вторичные изменения осадочных горных пород и их геологическое значение» обобщил некоторые из этих фактов и привел убедительные примеры образования многих минералов, которые раньше считались безусловно магматическими, не магматогенным путем. Таковы многие ортоклазы и плагиоклазы, турмалин, гранаты, флюорит, пирротин, молибденит, галенит, сфалерит и многие другие, нередко встречающиеся в осадочных породах в условиях, исключающих всякое воздействие магматической деятельности.

Таким образом, понятия «гидротермальный» и «магмато-

генный» не всегда являются синонимами; гидротермальные процессы могут быть магматогенными, но могут и не быть, являясь, например, метаморфогенными. Источником воды, газов и рудных элементов для этих процессов могут служить осадочные породы, которые в ходе геологического развития переносят все эти вещества из верхних частей земной коры в более глубокие области метаморфизма и, наконец, магматизма, что соответствует современным представлениям о большом геохимическом цикле миграции вещества.

Геохимические провинции и эпохи

Существуют тесные взаимные связи между тектоническими и магматическими процессами; следовательно, существуют зависимости и между тектоническими процессами и ассоциациями элементов, т. е. соответствующими магматогенными месторождениями полезных ископаемых. Эти идеи нашли свое выражение в представлениях о металлогенических провинциях¹.

Под металлогеническими провинциями обыкновенно понимают геологические или даже географические области, характеризующиеся развитием в их пределах определенных типов рудных месторождений. Такое определение носит чисто эмпирический характер, подчеркивая лишь приуроченность определенных типов месторождений к определенным территориям, что неизбежно, поскольку сами причины происхождения металлогенических провинций пока еще мало ясны.

Вопрос об этих причинах неоднократно ставился и обсуждался. Что касается изучения металлогенических провинций и металлогенических эпох для экзогенных месторождений, то здесь достигнуты значительные успехи, поскольку объекты исследования в этом случае доступны непосредственному наблюдению и в ряде случаев опытной проверке. Литология и историческая геология, с учетом данных по миграции химических элементов в гипергенных условиях, для целого ряда случаев вполне удовлетворительно могли объяснить приуроченность отдельных ископаемых к определенным геологическим и географическим областям, исходя из истории геологического развития этих областей и дифференциации химических элементов в процессах разрушения горных пород, переноса элементов и их аккумуляции.

¹ А. Е. Ферсман предлагал пользоваться более общим термином «геохимические провинции».

Гораздо сложнее обстоит дело с объяснением причин образования металлогенических провинций для эндогенных месторождений полезных ископаемых, поскольку здесь мы можем наблюдать лишь конечные результаты разнообразных сложных процессов дифференциации элементов, не имея возможности непосредственно наблюдать сами эти процессы, не зная точно, каковы эти процессы, а лишь догадываясь о них на основании тех или иных косвенных признаков или самых общих научных положений.

Опираясь на известные факты непосредственной генетической связи многих месторождений полезных ископаемых с гранитоидными интрузиями и исходя из того, что одни из этих месторождений располагаются обычно вблизи интрузий, а другие — дальше от них, при объяснении причин образования металлогенических провинций многие исследователи, естественно, стали придавать особо большое значение глубине эрозионного среза. Так, например, большой глубиной эрозионного среза стали объяснять отсутствие гидротермальных месторождений в районах развития пегматитовых жил, считая, что здесь сохранились лишь наиболее близкие к интрузиям или даже залегающие внутри их пегматиты с присущим им комплексом редких элементов, в то время как все месторождения, залегающие выше, были уничтожены эрозией. Той же причиной пытались объяснить и все другие случаи наличия или отсутствия магматогенных месторождений разного типа, полагая, что они образовывались на разном удалении от центра магматического очага, генерирующего рудные флюиды или растворы. Наиболее законченное выражение эта точка зрения нашла в известной батолитовой концепции Эммонса, согласно которой все гранитоидные батолиты обладают универсальной рудоносностью, т. е. способны создавать любые магматогенные месторождения полезных ископаемых, которые располагаются около этих батолитов согласно определенной схеме зональности. Исходя из этой концепции, вполне естественно, важнейшую причину металлогенических особенностей провинций усматривали именно в глубине эрозионного среза.

Безусловно, в этой концепции есть некоторые рациональные зерна. Действительно, разные магматогенные месторождения располагаются обычно на разном удалении от материнского гранитоидного очага. Однако в том виде, как эта батолитовая гипотеза была развита Эммонсом, она нас удовлетворить, конечно, не может, что в свое время было убедительно показано С. С. Смирновым. Достаточно сказать,

что идеальная схема Эммонса практически никогда не наблюдается в природе и, кроме того, имеется много веских возражений против основного положения этой гипотезы — универсальной металлоносности всех гранитоидных батолитов. Имеющиеся многочисленные наблюдения не подтверждают этого основного положения, а говорят против него, указывая, что с одними и теми же гранитоидными породами в одних районах связано по преимуществу полиметаллическое оруденение, в других — вольфрамовое или молибденовое, в третьих — золотое и т. д. Поэтому вполне естественно, появились представления о так называемых специализированных интрузиях, способных быть источником элементов тех или других месторождений полезных ископаемых. Одновременно у многих геологов рождалось и все более укреплялось убеждение, что существует определенная унаследованность в металлогеническом облике провинции, которая характерна для них независимо от геологического времени. Так, например, указывали провинции специфически медные, специфически золотые или полиметаллические и т. д., для которых в любую металлогеническую эпоху были характерны по преимуществу одни и те же типы месторождений. Наиболее яркое, даже гипертрофированное, выражение эта концепция в последние годы нашла в учении Шнейдерхена о регенерированных месторождениях.

Различия между металлогеническими провинциями, безусловно, существуют, так же, как существуют и различия в самом характере магм, с которыми связаны месторождения; эти магмы мы должны считать действительно специализированными. По вопросу о причинах этих явлений подавляющее число геологов придерживается той точки зрения, что эти различия объясняются неравномерным распределением химических элементов в земной коре с момента ее образования, считая это само собой разумеющимся и не пытаясь объяснить причины такого неравномерного их распределения. В действительности же у нас нет веских оснований говорить о первичном неравномерном распределении элементов в земной коре в горизонтальном плане, а есть основания утверждать обратное и считать, что реально существующие геохимические различия между отдельными участками земной коры являются следствием более поздних процессов. В период образования Земли состав ее, согласно существующим космогоническим теориям, был, вероятно, гомогенным, однородным. Различия в металлогении провинций многие зарубежные геологи пытались объяснить сверхглубинными разломами, по которым

поступали рудные эманации, совершенно отрицая роль магматических пород в образовании эндогенных месторождений. Эти идеи ультраструктуристов у нас не получили признания и были подвергнуты справедливой критике, как мало обоснованные.

В СССР получили некоторое развитие идеи, согласно которым металлогенические особенности провинций могут быть объяснены металлогенической специализацией магм в результате влияния вмещающих пород. Эта концепция отводит особое место явлениям ассимиляции магм. Так, П. Н. Кропоткин считает, что наиболее благоприятными условиями для проявления эндогенной минерализации отличаются районы, где развиты более ранние основные породы наряду с более поздними гранитоидными и где, по его мнению, широко проявились процессы ассимиляции основных пород кислыми магмами, которые в результате обогащались рудными элементами и становились способными затем генерировать магматогенные месторождения. А. П. Никольский ассимиляцией кислой магмой глинистых сланцев пытался объяснить специфические особенности оловянных гранитных магм. Наиболее полное и последовательное развитие эти идеи получили в работах Х. М. Абдуллаева. По его представлениям, всякая гранитная магма является потенциально рудоносной, но она может дать месторождения лишь в том случае, если ассимилирует другие горные породы, которые могут обогатить ее рудными компонентами и летучими соединениями и определить, какие рудные компоненты должны сохраниться в интрузивных породах и какие перейдут в гидротермальные растворы. В связи с этим Х. М. Абдуллаев придает большое значение осадочным породам, ассимилируемым гранитной магмой; при этом, по его представлениям, меняется как состав самих гранитоидов, так и способность их давать те или другие гидротермальные месторождения. Эти месторождения располагаются вокруг гранитоидных батолитов и различаются по своему составу в зависимости от расстояния до материнской интрузии.

Наиболее широкое распространение получили у нас металлогенические представления школы Ю. А. Билибина, разрабатываемые в основном коллективом геологов ВСЕГЕИ. Сущность этих идей сводится к следующим основным моментам. Процессы образования минеральных месторождений теснейшим образом связаны с другими геологическими явлениями: тектоническими движениями, магматизмом и метаморфизмом, осадконакоплением и, следовательно, могут быть поняты лишь

с учетом всех этих явлений. В пределах континентов выделяются два основных типа крупных структур — платформы и подвижные пояса, которые имеют разную историю своего развития. Наиболее интенсивны и разнообразны эндогенные процессы в пределах подвижных поясов земной коры; с ними связана поэтому основная масса магматогенных месторождений. На платформах эндогенная минерализация является более однообразной.

В развитии подвижных поясов выделяются четыре этапа: раннему этапу отвечает развитие геосинклинали, средний этап характеризует превращение геосинклинали в складчатый пояс, в третий и четвертый этапы (поздний и конечный) происходит развитие складчатого пояса. В соответствии с выделенными этапами развития складчатых зон идет и эволюция в них магматической деятельности. Она начинается с проявления основных и ультраосновных магм, свойственных тем древним платформам, за счет которых эти подвижные пояса развиваются. Затем эти магмы сменяются гранитоидными дифференциатами основной магмы, а потом с переходом геосинклинали в складчатый пояс — самостоятельными гранитоидными магмами. После этого наблюдается последовательная смена магм в обратном направлении: самостоятельные гранитоидные магмы позднего этапа сменяются гранитоидными дифференциатами основной магмы, и, наконец, когда подвижной пояс превращается в молодую платформу, снова появляются недифференцированные основные магмы, свойственные платформе.

В соответствии с эволюцией магматической деятельности идет и распределение минеральных месторождений во времени. С основными и ультраосновными магмами раннего этапа связаны магматогенные месторождения сидерофильных элементов (железа, хрома, титана, никеля, кобальта и др.), элементов группы платины, а также фосфора. С гранитоидными дифференциатами основной магмы связаны гидротермальные и контактово-метасоматические месторождения железа, меди, свинца, цинка, барита, отчасти кобальта, мышьяка, серебра и золота. Для среднего этапа с его самостоятельными гранитоидными магмами характерны гидротермальные и контактово-метасоматические месторождения вольфрама, олова, молибдена, золота, а также гранитные пегматиты с их редкими элементами — литием, бериллием, танталом, ниобием и др. В поздних этапах вначале наблюдается тот же комплекс элементов, как и в средних (олово, вольфрам, молибден, золото), потом к ним присоединяются железо, никель,

кобальт, серебро, свинец, цинк, медь и другие элементы, свойственные гранитоидным производным основных магм.

В ходе развития подвижных зон намечается определенная последовательность также и в смене осадков: для наиболее раннего этапа характерны карбонатно-вулканогенные формации с осадочными месторождениями железа, марганца и алюминия. Затем возрастает роль терригенных толщ, которые для среднего этапа являются основными. В поздний и конечный этапы роль осадконакопления ослабевает, с ними связаны угленосные и соленосные формации.

Эта схема, так же как и некоторые другие построения, принятые в последнее время в связи с проблемой металлогении, пока удовлетворить нас не может в силу, с одной стороны, большой схематичности самих этих построений, с другой стороны, вследствие дискуссионности некоторых самых основных положений, которые кладутся в качестве фундамента в основу этих построений. Одним из наиболее крупных недостатков предложенных схем является, по нашему мнению, недоучет дифференциации химических элементов при гипергенных процессах, совершающихся в грандиозных масштабах на наших глазах. Мы уже упоминали, что неравномерное распределение элементов на Земле как в вертикальном, так и в горизонтальном разрезе не является первичным, свойственным нашей планете с момента ее образования, так как это противоречит всем существующим космогоническим представлениям. Современное неравномерное распределение элементов явилось результатом ряда сложных и длительных процессов.

Неравномерное распределение элементов в вертикальном направлении по геосферам и внутри геосфер в принципе довольно удовлетворительно объясняется явлениями гравитации и химическими свойствами элементов, позволяющими классифицировать их на литофилы, халькофилы, сидерофилы и атмофилы. Гораздо сложнее обстоит дело с объяснением причин неравномерного распределения элементов в горизонтальном разрезе, с чем как раз и имеет дело металлогения. Как мы видели, предложенные объяснения этих причин нас удовлетворить не могут. Необходимо учитывать дифференциацию элементов при гипергенных процессах, включающих разрушение пород при выветривании, сортировку элементов в процессе миграции и образование новых ассоциаций при осадкообразовании и последующих процессах диагенеза, эпигенеза и метаморфизма. Примерами подобной дифференциации элементов являются огромные массы осадочных карбонатов, песков, илов, -фосфатов, окислов железа и т. д.; все они

по своему составу отличаются друг от друга, так же как и от состава исходных магматических пород, подвергшихся разрушению в гипергенных условиях. Осадочные породы отличаются по составу одна от другой не только в отношении главных компонентов, но и в отношении ассоциирующих с ними цветных металлов, редких элементов и т. д.; больше того, состав этих акцессорных элементов для одной и той же осадочной породы на разных территориях часто оказывается различным, отражая различия в дифференциации элементов при гипергенных процессах.

Важно отметить, что в настоящее время появляется все больше и больше доказательств в пользу того, что в условиях больших глубин, при высоких температурах и давлениях, при наличии воды и других подвижных компонентов, содержащихся в осадках, последние претерпевают глубокую метаморфизацию, в том числе метасоматические превращения и переплавление, в результате чего могут образоваться магмы, геохимическая специфика которых будет отражать специфику осадочных пород. Уместно в связи с этим отметить, что В. И. Вернадский неоднократно высказывался в том смысле, что гранитная оболочка Земли представляет продукт переработки «былых биосфер», т. е. осадочных пород. В настоящее время эти идеи находят свое выражение в представлениях о большом геохимическом цикле элементов. Здесь необходима дальнейшая систематическая работа с целью конкретизировать отдельные положения и на фоне топтогеохимии отдельных территорий выяснить причины неравномерного распределения химических элементов.

Возвращаясь к роли тектоники в распределении химических элементов, следует подчеркнуть, что различные типы тектонических структур бесспорно предопределяют некоторые общие линии поведения элементов. Так, например, для районов развития глубинных дизъюнктивных дислокаций характерно поднятие с глубин магм или их горячих дериватов с образованием соответствующих жильных и других месторождений и накоплением в них многих халькофильных элементов. Районы развития пликативных тектонических форм характеризуются преимущественным перемещением элементов внутри самих осадочных формаций и типичны накоплениями галогенных отложений, месторождений угля, нефти и некоторых других полезных ископаемых. Области геосинклиналей являются местами накопления различных осадков и сопровождающих их разнообразных осадочных месторождений железа, марганца, алюминия, урана, фосфора и др.

Каждое тектоническое нарушение ведет прежде всего к механическому перемещению химических элементов; еще более важно другое обстоятельство: ассоциации элементов при тектонических перемещениях попадают в новые термодинамические и физико-химические условия, в результате чего устанавливаются новые равновесия, происходит приспособление горных пород, минералов и руд к новым условиям, осуществляемое путем миграции элементов. Так, например, подъем магм по тектонически нарушенным зонам приводит их в области более низких температур и давлений, что вызывает их кристаллизацию и отделение летучих фаз, т. е. ведет к дифференциации элементов, следствием чего является образование определенных типов изверженных горных пород и сопровождающих их тех или иных генетически связанных с ними месторождений полезных ископаемых (собственно магматических, пневматолитовых, гидротермальных и др.). Дальнейший подъем данного участка земной коры, сопровождаемый эрозией, выводит глубинные породы и месторождения на земную поверхность, в область господства гипергенных процессов, с характерным для нее режимом кислорода, воды, углекислоты, ролью организмов, сорбционных процессов и т. д., что определяет новые формы миграции элементов, разрушение старых и образование новых их ассоциаций.

Другим примером важной роли тектоники для хода геохимических процессов могут служить эпейрогенические движения и связанные с ними медленные перемещения береговой линии. Часто наблюдаемые в морских осадках циклы седиментации обычно представлены (снизу вверх) сменой конгломератов, песчаников, сланцев, известняков и, наоборот, сменной известняков, сланцев, песчаников и конгломератов. Первая часть разреза отвечает наступлению моря, вторая указывает на его отступление. Отсюда совершенно очевидно исключительное влияние положения береговой линии на характер ассоциаций химических элементов в данном пункте морского литогенеза: близость береговой линии обеспечивает поступление с суши в данный пункт по преимуществу крупного терригенного материала; образующиеся при этом осадки — брекчии и конгломераты — в общем дают те же ассоциации элементов, какие были свойственны и разрушающимся на суше породам; несколько дальше от берега образуются песчаники с ассоциациями механически и химически достаточно устойчивых минералов (кварца, полевых шпатов, цирконов, монацитов и др.), которые переносятся также механическим путем. Еще дальше от береговой линии отлагаются глинистые

осадки и, наконец, карбонаты (мергели, известняки, доломиты и др.), ассоциации элементов в которых уже существенно отличаются от ассоциаций в породах на суше, за счет механического и химического разрушения которых в конечном счете они образовались.

Приведенные примеры, подчеркивая зависимость ассоциаций химических элементов в осадках от положения береговой линии, одновременно иллюстрируют связь этих ассоциаций с литогенезом и палеогеографией. При этом, как показывает детальное рассмотрение вопроса об образовании осадков, должны быть приняты во внимание не только процессы переноса элементов с суши в морские бассейны и условия их осаждения, но также и те физико-географические явления, которые протекают в это время на суше и в результате разрушения горных пород подготавливают материал для миграции. Особую роль при этих процессах выветривания играют, как известно, климатические условия, определяющие характер растворов (их pH), развитие организмов и т. д. Эти важные вопросы детально изучаются в курсах почвоведения и литологии и выходят за рамки настоящей работы. Отметим лишь, что образующиеся в результате совокупного действия процессов выветривания, переноса, литогенеза и последующих процессов диагенеза разнообразные осадочные породы (песчаники, известняки, глины, гипсы и ангидриты, галогенные отложения и т. д.) представляют в конечном счете разнообразные типы закономерных ассоциаций химических элементов, которые часто сами по себе представляют месторождения полезных ископаемых или с которыми могут быть пространственно и парагенетически связаны месторождения некоторых других полезных ископаемых (угля, нефти, фосфора, ванадия, урана и др.).

Анализ проблемы связей ассоциаций химических элементов с геологическими и климатическими условиями позволил в свое время А. Е. Ферсману наметить несколько типов геохимических систем, т. е. таких природных соотношений элементов, которые вызываются основными генетическими циклами земной коры или климатическим режимом определенных широтных зон. Им были выделены следующие основные типы таких систем.

1. Щиты-платформы с господствующим преобладанием собственно магматических выделений; даже среди пегматитов здесь встречаются лишь их наиболее высокотемпературные корни.

2. Пояса примыкают непосредственно к щитам, развивают-

ся по ослабленным орогеническим зонам в пределах геосинклиналей между устойчивыми щитами. Являются областями интенсивных тектонических и магматических процессов и характеризуются развитием разнообразных жильных месторождений, связанных с ними.

3. Геохимические поля — области, однородные в геохимическом смысле, связанные с обширными (пространственно) скоплениями каких-либо ассоциирующих элементов, по преимуществу с определенными свитами осадочных пород. Последовательность этих пород и связанных с ними месторождений полезных ископаемых является закономерной и зависит от условий жизни водного бассейна, его углубления или, наоборот, обмеления.

4. Геохимические узлы — районы, которые испытали повторные наложения нескольких геохимических циклов, вследствие чего в них миграция элементов проходила особенно интенсивно. Для них характерны многоэтапные процессы минералообразования, явления наложения и омоложения месторождений, что приводит к образованию в пределах одного района месторождений разных типов. Эти узлы А. Е. Ферсман назвал геохимическими центрами сырья.

5. Геохимические провинции характеризуются определенными типами свойственных им элементов и находятся в зависимости от геологического районирования. Этим термином А. Е. Ферсман предлагал заменить понятие о петрографических и металлогенических провинциях, подчеркивая, что новый термин является более широким, синтезирующим оба указанных понятия.

Наряду с представлением о геохимических провинциях в науке утвердилось также представление о **геохимических эпохах**, явившееся развитием понятия о металлогенических эпохах. Уже давно было установлено, что некоторые месторождения полезных ископаемых приурочены по преимуществу к некоторым определенным геологическим эпохам и почти полностью отсутствуют в других. Например, месторождения каменного угля встречаются главным образом в отложениях каменноугольного, частично юрского и третичного периодов, хотя наземная растительность, за счет которой могли образоваться угли, появилась уже в девоне. Наиболее богатые первичные скопления золота связаны с археем и допалеозоем. Крупнейшие месторождения мусковита характерны лишь для докембрийских метаморфических сланцев. Месторождения ртути связаны главным образом с альпийским орогенезом. Наиболее крупные месторождения осадочных железных руд

приурочены к докембрию. Месторождения натриевой и калиевой селитры встречаются лишь начиная с верхнего мела. Месторождения барита и целестина не известны для древнейших эпох, они появляются лишь начиная с силура. Герцинская эпоха характеризуется преимущественным развитием месторождений свинца, цинка, серебра, меди, олова, вольфрама и других металлов.

Скопления полезных ископаемых, связанных с магматическими процессами, образуются преимущественно в эпохи орогенеза, т. е. в периоды тектонических нарушений земной коры и сопутствующей им магматической деятельности, с которой связано образование магматических, эманационных и гидротермальных месторождений.

В связи с эпохами орогенеза, согласно В. А. Обручеву и другим исследователям, обычно выделяют главные металлогенические эпохи: докембрийские (две или три), каледонскую (конец силура), герцинскую или варисцийскую (верхнепалеозойскую), киммерийскую (мезозойскую) и альпийскую. Эти главные эпохи иногда подразделяют на более узкие субэпохи. В качестве примера можно сослаться на известные схемы геохимических эпох для Сибири, предложенные в свое время В. А. Обручевым и А. Е. Ферсманом.

Новейшие исследования внесли в эти старые схемы В. А. Обручева и А. Е. Ферсмана серьезные коррективы, но сама идея о геохимических эпохах не только сохранилась, но и получила новые подтверждения. В эпохи относительного тектонического покоя, отделяющие одну от другой эпохи орогенеза, особое значение приобретали процессы эрозии и денудации, выравнивающие формы земной поверхности, созданные горообразовательными процессами. В результате разрушения месторождений и пород, а также вследствие биогенных процессов при этом создавались разнообразные месторождения поверхностного, гипергенного типа, в том числе осадочные месторождения железа, марганца, алюминия, фосфора, солей, угля, нефти и многих других рудных и нерудных полезных ископаемых, образование которых требует длительных периодов накопления и примерно одинаковых в течение этих периодов геохимических условий.

Анализируя причины геохимических эпох, можно высказать некоторые общие соображения. Прежде всего следует иметь в виду, что некоторые внешние факторы, определяющие миграцию химических элементов в ходе геологической истории нашей планеты, существенно менялись. Так, например, менялись кларки ряда элементов: они уменьшались для урана,

тория, калия и других радиоактивных элементов и увеличивались для радиогенного свинца, гелия, аргона и других стабильных конечных продуктов радиоактивного распада. Значительно изменился за время геологической истории также энергетический баланс нашей планеты: в древнейшие времена на Земле было гораздо больше радиоактивных элементов и количество радиогенного тепла, как показывают расчеты, 3 млрд. лет тому назад было примерно в 2 раза, а 5 млрд. лет тому назад — в 5 раз больше, чем сейчас. Это не могло не сказаться существенным образом на интенсивности магматических и метаморфических процессов, которые в древнейшее время, очевидно, проявлялись более интенсивно, чем в более поздние геологические эпохи.

Особое значение для миграции химических элементов имело появление на Земле жизни, что коренным образом изменило поведение в первую очередь биогенных элементов, но оказалось очень важным и для всех других. С этого момента стали возможны биогеохимические процессы и могли образовываться месторождения нефти, угля, торфа, горючих газов, фосфатов, диатомитов, биогенных карбонатов и многих других. Важным моментом явилось образование на суше почвенного покрова. Появление биолитов интенсифицировало процессы сорбции элементов и повлекло за собой образование многих ассоциаций элементов, не известных ранее. Особенно важно было связанное с эволюцией жизни на Земле появление в атмосфере свободного кислорода — продукта жизнедеятельности зеленых растений. С этого момента на Земле пошли многочисленные реакции окисления и стали возможны такие формы миграции элементов, которые до тех пор не имели места. Естественно, что появление свободного кислорода в атмосфере и гидросфере особенно сильно сказалось на поведении элементов переменной валентности, таких, как железо, марганец, уран, сера и многих других.

Так, можно считать бесспорным, что в древнейшие времена, когда на Земле не было зеленых растений и, следовательно, не было в атмосфере и гидросфере свободного кислорода, но было много углекислого газа, миграция железа в растворах осуществлялась главным образом в форме хорошо растворимого бикарбоната двухвалентного иона. В этой форме железо поступало в гидросферу и постепенно в течение миллиардов лет накапливалось в морях и океанах, оставаясь в растворимой форме в соответствии с высокой растворимостью указанного соединения.

Можно, следовательно, предполагать, что древнейшая

гидросфера, лишенная свободного кислорода, была во много раз богаче железом, чем современная, в которой содержание его ничтожно мало ($5 \cdot 10^{-6}\%$), соответственно с ничтожно малой растворимостью гидрата окисного железа — наиболее устойчивой в присутствии кислорода формы нахождения железа в гидросфере. С появлением на Земле свободного кислорода бикарбонат закисного железа неизбежно переходил в указанное труднорастворимое соединение — гидрат окиси, что повлекло за собой переход в конечном счете громадных масс растворенного до тех пор в морях и океанах железа в твердую фазу и образование грандиозных осадочных месторождений железа в верхах докембрия. Эти месторождения образовывались как вблизи берегов, так и вдали от них — везде, где был свободный кислород. В этом, а также в грандиозных масштабах самих месторождений характерное отличие указанных докембрийских осадочных железных руд от всех более поздних, которые образовывались лишь вблизи береговой линии, за счет поступления железа с суши, так как лишь здесь концентрации железа могли быть существенно повышены по сравнению с общим ничтожным содержанием его в более поздней гидросфере.

Другим ярким примером, иллюстрирующим роль свободного кислорода в атмосфере Земли, может служить поведение серы. Пока на Земле не было свободного кислорода, очевидно, не могли образовываться и сульфаты; поэтому, в отличие от более поздних геологических периодов, древнейшая гидросфера была практически лишена сульфатов. Этой причиной естественнее всего можно объяснить тот давно установленный литологами факт, что месторождения сульфатов — гипса, целестина, барита и т. д. — не известны в древнейших отложениях и впервые появляются лишь в конце докембрия.

Образование разнообразных месторождений, генетически связанных с застывающими магматическими очагами, безусловно, имело место во все периоды существования земной коры. Эти месторождения образуются на разном удалении от магматических очагов: одни в непосредственной близости от них, другие — на значительном расстоянии. К последней группе относятся, например, телетермальные месторождения ртути, сурьмы, мышьяка, свинца, цинка, меди и других металлов. Образовавшись на разном удалении от магматического очага, месторождения имеют, естественно, различную вероятность сохраниться от эрозии, денудации и других процессов разрушения в течение последующего длительного геологического времени; больше шансов сохраниться будет,

в общем, у высокотемпературных месторождений, образовавшихся на больших глубинах, чем у низкотемпературных, телетермальных месторождений. Этой причиной можно объяснить такие хорошо известные факты, как приуроченность низкотемпературных месторождений ртути, сурьмы, мышьяка и ряда других элементов преимущественно к молодым альпийским горным сооружениям, поскольку более древние месторождения этих элементов были уничтожены полностью или в значительной своей части. Этой же причиной можно объяснить также приуроченность к древнейшим геологическим эпохам месторождений наиболее глубинного генезиса, в том числе пегматитов высокотемпературных фаз, и отсутствие среди них древних гидротермальных и пневматолитовых месторождений.

В разрушении месторождений помимо поверхностных процессов выветривания, эрозии и денудации большое участие принимают подземные воды, разрушая минералы и растворяя соединения химических элементов. Эта разрушительная деятельность подземных вод начинается в более или менее заметных масштабах на некоторой глубине, там, где присутствуют эти воды, и очень быстро возрастает по направлению к поверхности, как за счет увеличения массы этих вод, так и за счет более интенсивной их миграции и большей химической активности, вызванной возрастанием количества растворенного кислорода, что имеет особое значение при разрушении сульфидных месторождений.

В этом же направлении происходит и поверхностное разрушение месторождений путем эрозии и денудации: особенно интенсивно и здесь будут разрушаться наиболее удаленные от магматических очагов месторождения или их части.

Следующей причиной, объясняющей неравномерное распределение химических элементов по различным геологическим эпохам, является различная способность элементов к миграции. Этой причине придавал особое значение А. Е. Ферман, связывая различную миграционную способность элементов с энергетическими свойствами их ионов и образуемых ими кристаллических решеток. Как следует из геотермической теории, предложенной А. Е. Ферманом, энергетические коэффициенты ионов (эки) определяют их подвижность, относительную растворимость и механическую прочность образуемых ими соединений и другие важные для миграции свойства элементов.

В ходе постоянно протекающих в земной коре процессов дифференциации элементов между жидкими и твердыми

фазами (расплавы, растворы и образующиеся при их охлаждении минералы) имеет место разделение элементов, причем наибольшей склонностью переходить в твердые фазы отличаются при прочих равных условиях ионы высоких валентностей и малых радиусов, в то время как ионы с низкими валентностями и большими радиусами постепенно накапливаются в жидких фазах, из которых могут перейти в твердые фазы — минералы лишь в конце процессов дифференциации, когда их концентрации в жидких фазах достигнут достаточно больших величин, превышающих их растворимость при данных условиях.

В качестве примеров, иллюстрирующих это положение, можно привести накопление ряда одновалентных элементов в конечных стадиях дифференциации магматического расплава — в гранитных пегматитах (калий, натрий, рубидий, цезий, литий, таллий и др.), а также накопление одновалентных и двухвалентных элементов в гидросфере (хлор, натрий, иод, бром, магний, кальций и др.). В том и другом случае элементы более высоких валентностей и малых радиусов ионов постепенно в ходе дифференциации уходят в твердые фазы, в результате чего остаточные расплавы и растворы все более обогащаются маловалентными ионами с большими радиусами.

Правда, в пегматитовых жилах и в гидросфере накапливаются и некоторые элементы высоких валентностей; таковы, например, тантал и ниобий для пегматитов, сера для гидросферы. Они находятся в них в форме соответствующих комплексных ионов, обладающих большими радиусами и относительно малыми валентностями, что также находится в соответствии с геоэнергетической теорией. Особенно ярко это проявляется для серы, которая в гидросфере присутствует в форме комплексного аниона $(\text{SO}_4)^{2-}$, имеющего валентность, равную двум, и радиус, равный 2,95 Å, превышающий по своим размерам радиусы всех простых анионов. То же относится к комплексному аниону $(\text{CO}_3)^{2-}$ — другому характерному аниону гидросферы.

В случае ионов одной и той же валентности особую роль играет, с точки зрения указанной теории, размер радиусов ионов. Это особенно хорошо иллюстрируется примерами двухвалентных магния и кальция. Радиус иона магния равен 0,78; радиус иона кальция — 1,06. При одной и той же валентности магний должен предпочтительно перед кальцием переходить в твердые фазы. Это подтверждается многочисленными наблюдениями в природе; так, например, в ходе

дифференциации магмы магнезиальные орто- и метасиликаты образуются раньше кальциевых, давая в стадию протокристаллизации соответствующие ультраосновные породы, обогащенные магнием.

То же подтверждается поведением указанных элементов и в гидросфере: так, например, в углекислых осадках морей магний со временем замещается кальцием, который поэтому в меловых и третичных породах играет все большую и большую роль, в то время как в древних осадках, особенно архейских, доломиты существенно преобладают над известняками. В современных реках кальций преобладает над магнием, хотя кларки их в земной коре и являются одинаковыми.

Та же идея подтверждается и примерами элементов, обладающих близкими размерами ионов, но разными валентностями. Таковы, например, натрий ($r_i = 0,98$) и кальций ($r_i = 1,06$). Рассматривая изоморфные соединения этих элементов (плаггиоклазы) в ходе процессов кристаллизации магм, мы имеем на первых этапах минералы, обогащенные кальцием (основные плаггиоклазы), которые в дальнейшем сменяются все более кислыми разновидностями, по мере возрастания в них содержания альбитовой молекулы. На последних этапах дифференциации земного вещества — в гидросфере — натрий уже существенно преобладает над кальцием, который значительно раньше его уходит в осадки.

Конечно, при всех указанных рассуждениях необходимо, как на это указывал и А. Е. Ферсман, учитывать не только энергетические свойства ионов, но и внешние факторы миграции элементов, особенно относительную их концентрацию в данной геохимической системе (закон действующих масс), окислительно-восстановительные условия, важные для элементов с переменной валентностью и т. д. В том случае, когда концентрация элементов в данном расплаве или растворе ниже, чем растворимость их наиболее труднорастворимых в этих условиях соединений, они, даже в случае их высоких энергетических коэффициентов, не смогут дать самостоятельных минералов и будут накапливаться в этих растворах или расплавах, если, конечно, не будут захвачены по законам изоморфизма кристаллическими решетками других, более распространенных элементов. Этой причиной, как известно, В. М. Гольдшмидт объяснял накопление многих редких элементов в остаточных пегматитовых расплавах и растворах. Этой же причиной проще всего можно объяснить полное отсутствие или исключительную редкость минералов у большого

числа редких и рассеянных элементов (рений, галий, скандий, радий, германий и др.).

Роль окислительно-восстановительных условий прекрасно иллюстрируется железом и элементами его группы: в восстановительных условиях, при наличии углекислоты, железо, как известно, может накапливаться в растворах в очень больших концентрациях, в соответствии с высокой растворимостью бикарбоната его двухвалентного иона; в присутствии свободного кислорода образуется труднорастворимый гидрат окиси железа, чем и объясняется в конечном счете исключительный дефицит железа в современной гидросфере. Роль указанного фактора особенно ярко иллюстрируется при сравнении поведения железа в докембрийское время с его поведением сейчас, о чем было сказано несколько выше. То же самое можно иллюстрировать примерами из геохимии марганца и многих других элементов переменной валентности.

Для элементов, не меняющих своей валентности, очевидно, смена окислительных условий на восстановительные и обратное не будет иметь существенного значения; примером таких элементов может служить алюминий: его поведение в этом отношении существенно отличается от поведения железа и мы для него не имеем металлогенических эпох, объясняемых, как для железа, сменой окислительно-восстановительной обстановки.

Таковы некоторые геохимические соображения в связи с металлогеническими провинциями и эпохами, которые следует учитывать при поисках.

Ореолы и потоки рассеяния элементов

Химические элементы в земной коре встречаются, как известно, не только в форме тех или иных концентраций, но и в рассеянном состоянии. Рассеянное состояние является характерным для всех элементов, что еще в начале нашего столетия подчеркивал В. И. Вернадский; это состояние более характерно, чем состояние концентрации. Известно большое число химических элементов, которые в земной коре не образуют сколько-нибудь заметных концентраций, не дают месторождений в обычном понимании этого слова и не образуют собственных минералов, как, например, индий, радий и другие, или образуют их исключительно редко (галий, германий, скандий и др.), но мы не знаем ни одного элемента, большая или меньшая часть атомов которого не была бы рассеяна в

жидких или твердых, а иногда и в газообразных продуктах земной коры.

Подсчеты показывают, что для подавляющего числа химических элементов, если не для всех, число их атомов, находящихся в состоянии рассеяния, во много раз превышает их число, заключенное в месторождениях. Их отношение измеряется обычно тысячами и миллионами, что легко доказывається путем сопоставления масс элементов, заключенных в объеме земной коры (произведение их кларков на массу коры) и суммарных запасов этих элементов во всех месторождениях мира с учетом еще и не открытых, но возможных месторождений. Из этого вытекает, что для подавляющего числа химических элементов среднекларковые содержания их в земной коре в целом или в отдельных ее оболочках должны довольно точно соответствовать среднему содержанию тех же самых элементов в тех же объектах в состоянии рассеяния. Это относится в первую очередь ко всем редким и рассеянным элементам и, по-видимому, будет справедливо и для других элементов (за исключением разве водорода для гидросферы, азота для атмосферы и некоторых других немногих случаев). Это положение справедливо как для земной коры в целом, так и для отдельных ее частей, в том числе для пород того или иного района, для его вод или подземных атмосфер. Эти средние содержания данного элемента в породах, водах или подземных атмосферах изучаемого района обычно называют натуральным фоном этого элемента для данного района (для его пород, вод или атмосфер) или нормальным полем.

Понятие о натуральном фоне, как и о кларке, является некоторой средней величиной, с которой удобно сравнивать содержания тех же элементов в более повышенных или более низких концентрациях — в отдельных участках, среди площадей, для которых установлен натуральный фон. Когда говорят о кларке элемента в литосфере, в гидросфере или атмосфере, подразумевают среднее его содержание для каждой из этих геосфер. В случае натурального фона обычно ограничиваются относительно небольшим районом, представляющим в геологическом отношении единое целое (например, часть горного массива, сложенного разными породами, для натурального фона этих пород; подземные воды данной долины — для натурального фона этих вод и т. д.).

Формы нахождения химических элементов в состоянии концентрации нам достаточно хорошо известны; в твердых фазах — это по преимуществу минералы этих элементов и образованные ими горные породы и руды; в жидких фазах —

это сама вода, состоящая из водорода и кислорода, и растворенные в ней в значительных количествах соединения натрия, магния, хлора, серы и других элементов; в газообразных фазах — это важнейшие компоненты газовых смесей (азот, кислород — для надземной атмосферы, углеводороды, углекислый газ и другие — для некоторых подземных атмосфер и т. д.).

Что касается элементов в состоянии рассеяния, то формы их нахождения нам иногда не совсем ясны. Для твердых фаз это будут главным образом изоморфные смеси; катионы и анионы, сорбированные высокодисперсными минеральными и органическими частицами; элементы, растворенные в водах, пропитывающих горные породы и минералы; элементы в микроорганизмах, проникающих в верхние горизонты литосферы. В ряде случаев есть основания предполагать, что элементы рассеяния находятся в форме самостоятельных минералов, но размеры их исчезающе малы, и существующими прямыми оптическими методами мы их обнаружить пока не можем. На существование подобных субмикроскопических минералов указывают опыты воздействия на породы тех или иных реактивов, которые не действуют на сами породообразующие минералы (полевые шпаты, кварц, пироксены, амфиболы, слюды и др.), но растворяют субмикроскопические акцессорные минералы. Так, например, если на гранит подействовать слабой соляной кислотой или слабым раствором соды, часть содержащегося в граните в рассеянном состоянии урана легко переходит в раствор. Очевидно, что этот уран не входит в кристаллические решетки породообразующих минералов, так как указанные реактивы не разрушают этих минералов и, следовательно, не могут извлекать из них уран. Этот «легкоподвижный» уран может присутствовать, по-видимому, в следующих упомянутых выше формах: а) собственные субмикроскопические минералы урана, вероятно его окислы; б) уран в растворах, пропитывающих породу; в) уран, сорбированный на гранях других минералов. Все эти формы урана, рассуждая логически, возможны, и из всех них уран легко может извлекаться как слабыми кислотами, так и раствором соды. Есть веские основания утверждать, что большая часть указанного «легкоподвижного» урана приходится на долю его субмикроскопических самостоятельных минералов, вероятно, окислов, размеры которых приближаются, может быть, к размерам молекул этих соединений.

Так же как с ураном, который привлекал к себе в последние годы особое внимание и потому лучше изучен, обстоит

дело, по-видимому, и со многими другими находящимися в состоянии рассеяния элементами; у них также значительная часть атомов приходится, по-видимому, на долю субмикроскопических самостоятельных соединений.

Более или менее равномерное рассеяние атомов химических элементов в литосфере является следствием ряда причин. Оно прежде всего отражает то гомогенное состояние нашей планеты, которое было, по-видимому, характерно для первых периодов ее существования вне зависимости от способа ее образования — по схеме Канта — Лапласа, по новейшей теории О. Ю. Шмидта или по любой другой из предложенных гипотез. В эти первые периоды существования Земли все химические элементы были распределены в ней более или менее равномерно, в концентрациях, примерно отвечающих средним кларкам элементов. В дальнейшем, когда произошла дифференциация элементов по геосферам, на первых этапах существования этих геосфер распределение элементов в пределах их также было равномерным. Для атмосферы и гидросферы оно осталось равномерным и до сих пор, что легко объясняется их свойствами — способностью элементов в пределах этих геосфер к неограниченной миграции и перемешиванию, ведущих к выравниванию их состава. По-другому обстояло дело в литосфере: здесь в результате процессов миграции, связанных главным образом с понижением температур, шло образование из расплавленной магмы пород различного состава, сопровождаемое образованием разнообразных месторождений. Гомогенное распределение элементов сменилось гетерогенным; однако и в этом случае, если исключить месторождения, в которых, как уже указывалось, находится лишь совсем небольшая часть атомов химических элементов, заключенных в литосфере в целом, и в этом случае рассеянное состояние большинства элементов осталось характерным для них, причем средние содержания этих элементов в состоянии рассеяния довольно близко отвечают кларкам этих элементов для литосферы в целом.

Но рассеяние элементов может являться не только следствием указанной причины, т. е. неполноты разделения элементов в процессе первичной дифференциации. Есть и другие причины, которые тоже ведут к рассеянию. Сюда относятся, в частности, водные растворы, пропитывающие все породы и минералы и несущие в растворенном состоянии практически все химические элементы, с которыми они на своем пути встречаются. Эти растворы пространственно все связаны и в геологическом масштабе времени все подвижны, так же как

подвижны и растворенные в них элементы, благодаря чему их концентрации постепенно выравниваются.

Рас рассеяние элементов может осуществляться также микроорганизмами, в составе которых подавляющее число элементов присутствует в весьма малых количествах, т. е. в рассеянном состоянии. Рас рассеяние элементов, обладающих высокой упругостью паров, легко объясняется именно этой причиной; таковы благородные и другие газы, ртуть, летучие соединения углерода (углекислота, углеводороды и т. д.).

Наконец, одной из важных причин рас рассеяния некоторых элементов являются ядерные превращения элементов: образующиеся при этих превращениях неустойчивые полупродукты и стабильные изотопы элементов находятся в рассеянном состоянии в соответствии с медленностью указанных процессов превращения и малым выходом этих элементов.

На фоне рас рассеяний элементов, характеризующихся содержаниями, свойственными их средним кларкам, наблюдаются повышенные концентрации, характерные для скоплений элементов в их месторождениях. В. И. Вернадский в свое время ввел для них понятие кларков концентрации, под которыми понимал отношение содержаний этих элементов в месторождениях к их средним кларкам для земной коры в целом. Наряду с понятиями о натуральном фоне и о месторождениях практически оказалось весьма рациональным также понятие об ореолах рас рассеяния, генетически связанных с месторождениями и характеризующихся концентрациями элементов, более высокими, чем для натурального фона, но меньшими, чем для месторождений.

Под ореолами рас рассеяния обычно понимают зоны повышенных концентраций тех или иных элементов в горных породах, растениях или подземных водах вблизи месторождений, с которыми они генетически связаны. Ореолы рас рассеяния создаются около месторождений, как следствие общей тенденции к выравниванию химических потенциалов в результате миграции элементов из пунктов их высокой концентрации к местам более низких концентраций. Содержание искомого элемента в пределах ореола рас рассеяния является повышенным по сравнению с натуральным фоном за его пределами, т. е. является аномальным. По аналогии с кларком концентрации, введенным В. И. Вернадским для месторождений, можно говорить о среднем коэффициенте аномальности элемента в пределах ореола рас рассеяния ($K_{ан}$), понимая под ним отношение концентрации этого элемента в пределах ореола (C) к concentra-

ции его за пределами ореола, обозначаемой как натуральный фон (N), т. е. $K_{ан} = \frac{C}{N}$.

Средние коэффициенты аномальности всегда больше единицы, но меньше кларков концентрации. Наряду со средними коэффициентами аномальности для всего ореола можно вычислять коэффициенты аномальности для отдельных точек ореола. Эти последние могут варьировать в весьма широких пределах: вблизи месторождений они по своей величине будут приближаться к кларкам концентрации, а у границ ореолов будут по величине приближаться к единице, так как переход от аномальных значений к натуральному фону обычно, как показывает теория и имеющийся опыт, совершается постепенно.

В простейшем случае ореол рассеяния развивается вокруг месторождения за счет равномерной миграции химических элементов во все стороны от месторождения, и форма ореола в плане будет приближенно повторять контуры рудных тел. В действительности это наблюдается довольно часто при образовании вторичных ореолов рассеяния в элювии, а также для газовых ореолов рассеяния. В других случаях миграция элементов идет по преимуществу в одном направлении; это характерно для механического переноса элементов, например, по склонам гор, и для водной миграции с потоками подземных или поверхностных вод. В этих случаях геохимические аномалии приобретают характер потоков рассеяния. А. П. Соловов рассматривает потоки рассеяния как область повышенных содержаний искомого элемента, развивающуюся на путях поверхностного или подземного водного, газообразного или твердого стока с суши, прилегающую к ореолу месторождения и характеризующую дальнейшим убыванием аномальных значений поля рассеяния.

Под полем рассеяния А. П. Соловов понимает верхние горизонты современной суши, в которых протекают процессы выветривания и денудации, ведущие к разрушению и ликвидации ранее образовавшихся местных концентраций химических элементов. Таким образом, поле рассеяния является более общим понятием, чем ореолы и потоки рассеяния; те и другие являются частями поля рассеяния. Но такое понятие поля и ореола рассеяния не охватывает всех наблюдающихся в природе фактов, так как учитывает по существу лишь так называемые вторичные поля и ореолы рассеяния, связанные с разрушением ранее образованных месторождений в результате тех или иных гипергенных процессов.

Наряду с указанными вторичными полями, ореолами и потоками рассеяния имеются и первичные, образованные одновременно с месторождениями в результате тех же самых генетических процессов. Эти поля и ореолы иногда называют сингенетическими; соответственно вторичные поля, ореолы и потоки можно называть эпигенетическими.

Формы первичных ореолов в общем повторяют формы рудных тел, с которыми они генетически связаны; ореолы как бы чехлом обволакивают рудные залежи. Иногда они бывают оторваны от рудных тел, это нередко наблюдается для легколетучих элементов и их соединений (ртуть, мышьяк, сурьма и др.). Около пологопадающих рудных тел первичные ореолы обычно асимметричны: они шире в висячем боку, чем в лежащем, что объясняется преобладающим направлением движения рудоносных растворов и газов снизу вверх.

Движение растворов и газов, создающих ореолы в горных породах, происходит в результате их фильтрации и диффузии и зависит, следовательно, от фильтрационных и диффузионных свойств этих пород. Эти свойства, как известно, сильно меняются как для разных пород, так и для разных участков одной и той же породы. Этим объясняется тот важный факт, что в пределах ореола рассеяния содержания того или иного элемента могут существенно меняться, в результате чего, при среднем повышенном содержании элемента в пределах ореола в отдельных его участках могут быть как повышенные, так и пониженные против этого среднего содержания концентрации элемента.

В результате этих причин слабопроницаемые участки пород будут характеризоваться пониженными содержаниями элементов по сравнению с хорошо проницаемыми участками. Но на распределение элементов в пределах ореолов среди горных пород оказывают влияние также и последующие гипергенные процессы перераспределения вещества, идущие главным образом под влиянием растворов; в этом случае на пути движения этих растворов, т. е. в наиболее проницаемых участках, возможно как дальнейшее обогащение их теми или другими рудными элементами, так и их обеднение. Все это необходимо учитывать, интерпретируя характер литохимических ореолов рассеяния.

В зависимости от способа образования ореолов рассеяния, т. е. в зависимости от формы миграции химических элементов от месторождения в стороны от него, можно различать ореолы механические, водные, газовые и биогенные.

Механические ореолы и потоки рассеяния образуются в

результате переноса химических элементов механическим путем — в форме обломков горных пород, руд и минералов, т. е. являются следствием процессов механогенеза, по номенклатуре А. Е. Ферсмана. Эти ореолы и потоки рассеяния образуются лишь в результате разрушения месторождений, т. е. всегда являются вторичными, эпигенетическими.

Водные ореолы и потоки рассеяния наблюдаются в поверхностных и подземных водах, дренирующих месторождения; искомые элементы переносятся в растворенном состоянии и форма этих ореолов и потоков рассеяния отвечает обычно формам указанных поверхностных или подземных потоков. В этом случае они также являются вторичными, эпигенетическими, образуясь за счет разрушения месторождений. Но в результате водной миграции могут образовываться и первичные ореолы, сингенетичные с месторождениями, за счет рудоносных растворов, дающих как месторождения, так и окружающие их ореолы. Хотя миграция элементов в данном случае осуществлялась в форме растворов, элементы образующихся путем ореолов, как и в месторождениях, присутствуют преимущественно уже в твердых фазах в виде соответствующих минералов и сорбционных систем. Примерами подобных первичных ореолов, образовавшихся в результате водной миграции, могут служить разнообразные зоны гидротермально измененных пород около соответствующих гидротермальных месторождений.

Газовые ореолы образуются в окружающих породах в результате миграции элементов в газообразной форме. Эти ореолы характерны для легколетучих элементов и их соединений, в том числе для углеводородов, гелия, радона и т. д. и сопровождают залежи нефти, горючих газов, радиоактивных руд и других полезных ископаемых, генерирующих в обычных условиях эти газы. Указанные ореолы являются вторичными, эпигенетическими. Но в результате миграции элементов в форме газов могут образовываться и первичные ореолы; это имеет место при высоких температурах на глубинах, когда упругость паров многих соединений сильно возрастает. В результате газового переноса образуются пневматолитовые и некоторые скарновые месторождения и сопровождающие их ореолы. Роль газового переноса, по-видимому, довольно существенна и в случае гидротермальных месторождений и сингенетических с ними ореолов рассеяния, точно так же как и в случае пневматолитовых и скарновых месторождений и сопровождающих их ореолов, очевидно, важна и роль жидкой фазы. И в том и в другом случае роль газовой и жидкой фаз

в миграции элементов существенно зависит от температуры и давления: при повышении температуры возрастает роль газового переноса, при понижении температуры, наоборот, возрастает значение жидкой фазы. Повышение давления повышает роль жидкой фазы, понижение его способствует переходу жидкости в газ.

В том случае, когда в миграции химических элементов существенную роль играют биогенные процессы, могут образоваться своеобразные биогенные ореолы, связанные с живым веществом. Так, например, произрастающие над месторождением или его механическим ореолом растения могут существенно обогатиться элементами, свойственными этому месторождению и тем самым будут отличаться по своему составу от тех же растений, но произрастающих вдали от месторождения и его ореола.

Другим примером биогенных ореолов (точнее потоков) рассеяния могут служить своеобразные микрофлора и микрофауна, развивающиеся на пути движения углеводородных газов над нефтяными и газовыми залежами.

Формы и размеры ореолов рассеяния определяются рядом причин: они различны для разных элементов, определяясь внутренними факторами их миграции, т. е. причинами, связанными со свойствами этих элементов. Большую роль при этом играет форма миграции элементов в период образования ореолов; очевидно, что, если одни элементы мигрируют при данных внешних условиях в газообразной форме, а другие — в жидкой, размеры ореола рассеяния первых будут более значительными, чем вторых; различными будут и формы ореолов, поскольку способность к миграции газов и жидкостей среди горных пород разного состава и разной степени нарушенности, очевидно, будут разными. Газы стремятся занять весь предоставленный им объем пространства, распространяясь по трещинам и порам, диффундируя через жидкости и твердые тела в соответствии с их коэффициентами диффузии, стремясь создать, таким образом, вокруг месторождений — источников этих газов — более или менее изометрические формы ореолов. Изометричность в естественных условиях обычно существенно нарушается неоднородностью окружающей среды.

Несколько иную картину мы наблюдаем при миграции жидкостей; они труднее, чем газы, диффундируют через горные породы, поэтому больше в своем движении связаны с различными тектоническими нарушениями, способствующими их движению. Большое значение при движении жидкостей

приобретает также гравитационный фактор, обусловленный их высоким, по сравнению с газами, удельным весом; роль этого фактора особенно наглядна при нормальных давлениях, что, например, мы имеем на земной поверхности; жидкости при этом стремятся занять самое низкое возможное положение в отличие от газов, которые во все стороны распространяются практически одинаково.

Указанные причины объясняют различие размеров и форм первичных ореолов, обязанных миграции элементов, с одной стороны, в жидких формах, с другой стороны, в газообразных. Это наглядно иллюстрируется путем сравнения, например, углеводородных (газовых) ореолов, связанных с нефтяными залежами, с ореолами около гидротермальных месторождений, обязанных движению элементов в форме растворов: первые ореолы и более значительны по размерам и обычно более изометричны, чем вторые.

Но даже и в том случае, когда элементы мигрируют в одной и той же фазе (газообразной или жидкой), их ореолы в общем случае будут различными по размерам и форме, так как способность к миграции у разных элементов является различной. Так, например, если мы сравним водород (молекулярный вес равен 2) с кислородом (молекулярный вес равен 32), то придем к выводу, что в случае диффузии скорости распространения этих газов будут относиться как 4 : 1, поскольку эти скорости обратно пропорциональны квадратному корню из их молекулярных весов; другими словами, за данный промежуток времени в результате диффузии водород пройдет путь в 4 раза длиннее, чем кислород.

В растворах, диффундирующих через горные породы, различные элементы передвигаются также с разной скоростью, согласно их дифференциальной подвижности, что было доказано Р. Маккеем и Д. С. Коржинским. Как показали экспериментальные исследования физико-химиков, при прохождении растворов через полупроницаемые перегородки происходит некоторая задержка растворенного вещества по сравнению с растворителем, вследствие чего концентрация вещества в растворе, прошедшем через перегородки, несколько снижается. Для разных катионов и анионов этот «фильтрационный эффект» различен, что может, по мнению некоторых исследователей, приводить к важным геохимическим следствиям, в том числе к разделению элементов в пространстве около рудных тел. В результате такого разделения элементы в пределах первичных ореолов, образовавшихся из водных растворов, должны распределяться зонально, в соответствии

с их относительной подвижностью, определяемой скоростью их и проницаемостью при диффузии. Согласно Р. Маккею, относительная подвижность ионов металлов в пределах изо-валентных групп периодической таблицы возрастает сверху вниз (например, она растет в ряду литий — натрий — калий — рубидий — цезий); в горизонтальных рядах периодической таблицы какой-либо металл имеет большую подвижность, чем ближайший к нему металл с более высокой валентностью. Эти выводы сделаны в предположении, что подвижность ионов является следствием гидратации (с ростом числа молекул в гидратационной оболочке подвижность падает), поскольку сама гидратация находится в обратной зависимости от ионного потенциала, т. е. частного от деления заряда иона на его радиус. Следовательно, подвижность ионов растет вместе с увеличением радиусов ионов и уменьшением их валентности; она тем больше, чем меньше ионный потенциал (или чем меньше энергетический коэффициент иона по А. Е. Ферсману).

Исходя из этих соображений, Маккей дает такой ряд последовательности отложения элементов из гидротермальных растворов: олово, медь, цинк, свинец, ртуть. Не трудно видеть, что этот ряд довольно хорошо совпадает с известным рядом Эммонса: олово, вольфрам, мышьяк, медь, цинк, свинец, серебро, сурьма, ртуть. Напомним, что указанный ряд выведен был Эммонсом в 1924 г. на основе фактических наблюдений и объяснялся им и другими исследователями как следствие отложения из растворов под влиянием понижения температуры. А. Е. Ферсман объяснял указанную последовательность выпадения элементов из растворов, исходя из энергетических соображений — с точки зрения теории парагена.

Н. И. Сафронов в статье «К теории первичных ореолов рассеяния»¹, основываясь на указанных выше соображениях, предполагает, что подобная рядам Эммонса последовательность в распределении элементов должна наблюдаться и в литохимических ореолах, обязанных своим происхождением диффузии растворов. Некоторые различия будут иметь место в связи с тем, что скорость диффузии значительно меньше, чем скорость инфильтрации, а также в результате изоморфизма, когда распределение элементов будет в основном определяться размерами радиусов ионов.

Кроме того, распределение элементов в пределах литохи-

¹ Информационный сборник № 21, 1959 г. Изд. ВИТР, Министерство геологии и охраны недр СССР.

мических ореолов связано, как уже указывалось ранее, не только и не столько с процессами диффузии, как с процессами инфильтрации и механического переноса, поэтому реальное распределение элементов в пределах указанных ореолов будет, конечно, существенно отличаться от распределения согласно идеальной схеме, подобно тому как это имеет место и в отношении схемы Эммонса для распределения элементов внутри охлаждающегося магматического очага.

Н. И. Сафронов обратил также внимание на необходимость изучения изотопного состава элементов в пределах литохимических ореолов, обязанных своим происхождением диффузии. Как известно, подвижность изотопов данного элемента зависит от их массы и выражается следующим образом:

$$V_1 = \frac{k}{\sqrt{m_1}}; \quad V_2 = \frac{k}{\sqrt{m_2}}; \quad V_n = \frac{k}{\sqrt{m_n}},$$

где $V_1, V_2 \dots V_n$ — подвижность изотопов данного элемента; $m_1, m_2 \dots m_n$ — массы изотопов; k — постоянная величина для всех изотопов данного элемента.

Из указанных выражений следует, что $\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$.

Пути, пройденные отдельными изотопами, будут пропорциональны их подвижности (скорости):

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}};$$

отсюда:

$$S_1 = S_2 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}.$$

S_1 и S_2 непосредственно измерить невозможно, но можно определить полевыми наблюдениями $\Delta S = S_2 - S_1$. ΔS — обгон тяжелого изотопа более легким.

$$S_1 = S_2 - \Delta S = S_2 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}};$$

$$\Delta S = S_2 - S_2 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = S_2 \left(1 - \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \right).$$

Отсюда:

$$S_2 = \frac{\Delta S}{1 - \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}}.$$

Таким путем, определив в поле ΔS и зная m_1 и m_2 , можно оценить расстояния до центра начала движения изотопов.

Из приведенных рассуждений следует, что изотопический состав элементов в пределах указанных ореолов должен несколько меняться: более легкие изотопы пройдут более значительный путь от начала движения и, следовательно, несколько обогатят периферические части ореолов, по сравнению с центральными, где будут накапливаться более тяжелые изотопы.

Указанные теоретические выводы нуждаются, конечно, в соответствующей проверке на реальных месторождениях и их ореолах; пока в этом отношении сделано весьма мало. В качестве примера можно привести полиметаллические месторождения Ледвилл в Колорадо (США), в литохимических первичных ореолах которого изучалось распределение изотопов кислорода и было показано, что отношение O^{16}/O^{18} возрастало по направлению от рудных залежей в соответствии с большей подвижностью легкого изотопа в процессе диффузии элемента.

Если сделанные теоретические предположения относительно зонального распределения элементов и их изотопов в пределах ореолов подтвердятся практикой, их использование в целях геохимических поисков может оказаться весьма перспективным.

Можно ожидать, что фильтрационный эффект будет проявляться наиболее наглядно в тех случаях, когда горные породы представляют именно «полупроницаемые перегородки», как это наблюдается в физико-химических экспериментах; в породах, разбитых трещинами или грубопористых, где движение растворов происходит достаточно свободно, роль фильтрационного эффекта, очевидно, будет весьма скромной. Этот вопрос нуждается в соответствующих экспериментальных исследованиях, проводимых в условиях, близких к природным.

Размеры и формы ореолов рассеяния определяются помимо свойств самих элементов также и условиями окружающей обстановки, т. е. внешними факторами миграции. Поэтому для одного и того же химического элемента, но в условиях разной тектонической или литологической обстановки, ореолы рассея-

ния, их размеры, конфигурация, а иногда даже и формы нахождения самих элементов будут разными. Большую роль играют при этом, как известно, структурные факторы. Например, для ртутных ореолов рассеяния установлено повышение концентрации ртути в сводовых частях антиклинальных складок, а также вдоль зон дорудных нарушений. Так, Н. А. Озерова на примере ртутных, сурьмяных и полиметаллических месторождений показала, что пробы пород, отобранные вблизи дорудных или интратрудных нарушений, характеризуются обычно аномальными концентрациями ртути, значительно превышающими ее концентрации в пробах тех же пород, но взятых вдали от указанных нарушений. Таким путем, отбирая и анализируя пробы в пределах первичных ореолов рассеяния ртути, можно фиксировать дорудные нарушения даже в том случае, если на поверхности они выражены слабо или даже совсем не выражены. На этом основании Н. А. Озерова предлагает использовать указанное обстоятельство при геологическом картировании и разделении нарушений на дорудные и послерудные.

Все эти факты легко объясняются предположением, что гидротермальные растворы сопровождалась ртутной атмосферой (вследствие высокой упругости ртутных паров при температурах гидротерм) и ртуть мигрировала в значительной части в форме паров, преимущественно по путям, заложенным предыдущими, т. е. дорудными тектоническими нарушениями.

Меньше изучено влияние на ореолы рассеяния литологического фактора, хотя уже заранее можно предполагать, что влияние его будет значительным, и в ряде случаев даже решающим. При этом роль пород будет проявляться по крайней мере в двух разных отношениях: с одной стороны, важное значение будут иметь структура пород и их пористость, определяющие их фильтрационные и диффузионные свойства, с другой стороны, немаловажную роль будут играть химические и определяемые ими минералогические свойства горных пород, от чего зависит их реакционная способность, в том числе способность переводить элементы из газообразной или жидкой фазы, в которой они мигрировали, в твердое состояние — в минералы и сорбционные системы и тем самым ставить предел их миграции. Роль литологического фактора особенно наглядно проявляется, когда мы сравниваем породы разной степени проницаемости, например пористые песчаники и глинистые сланцы. Они обладают разными фильтрационными и диффузионными свойствами, а следовательно, и по-разному пропускают газы и жидкости. Поэтому, в общем

случае, ореолы в песчаниках могут развиваться легче, чем в сланцах. Правда, в геологических условиях эта разница может иногда затушевываться: в течение длительного времени растворы, а тем более газы, даже и через труднопроницаемые глинистые сланцы успевают продиффундировать на значительные расстояния от месторождений.

Большое значение имеют также минералогический и химический состав пород, способность их реагировать с растворами и газами; в этом смысле, например, химически довольно инертные песчаники будут существенно отличаться от активных в химическом отношении карбонатных пород. Поэтому ореолы рассеяния в известняках будут, как правило, характеризоваться более причудливыми формами, чем ореолы в песчанике, особенно если растворы содержали в своем составе углекислоту, и, следовательно, обладали способностью растворять карбонаты и вызывать в них карстовые процессы. В случае, если растворы были кислыми, карбонатные породы вызовут, в отличие от песчаников, их быструю нейтрализацию и отложение содержащихся в этих кислых растворах различных элементов; в этом случае ореолы среди карбонатных пород, очевидно, будут мало протяженными по размерам, но интенсивными по концентрации элементов.

Интересные данные по литологическому контролю на основе анализа огромного материала по месторождениям ртути в Средней Азии и в пределах Тихоокеанского пояса собрал и обобщил В. П. Федорчук. Автор показал, что ореолы рассеяния ртути охватывают все литологические разновидности пород разреза, иногда для некоторых месторождений достигающего 2500 м. В пределах разреза можно выделить отдельные маркирующие горизонты, характеризующиеся резко повышенным содержанием ртути; обычно ими являются породы сланцевого экрана или горизонты карбонатно-глинистых пород (мергелей и др.), залегающих в кровле рудоносной толщи.

Ртуть в пределах ореолов находится обычно в форме киновари; об этом свидетельствуют протоочки проб: тяжелая фракция их обычно всегда содержит некоторое количество знаков киновари. Это особенно относится к известнякам, доломитам и песчаникам. Но иногда даже при относительно высоком содержании ртути в породах (до сотых долей процента) киноварь в протоочках не обнаруживается. Это можно объяснить частью тем, что зерна киновари очень малы и их невозможно обнаружить обычными методами исследования, частью же тем, что ртуть, может быть, по законам изо-

морфизма входит в состав других минералов, присутствующих в ореоле. И, наконец, можно предположить, что ртуть частично присутствует в самородной форме, являясь продуктом переноса в парообразной форме или продуктом некоторых последующих реакций.

Вхождение ртути в различные минералы в свое время было доказано для ряда месторождений нами¹. Дополнительные данные привел В. П. Федорчук для ряда минералов, установленных в пределах ртутных ореолов. Согласно его данным, содержание ртути в кальците варьирует от 0,0000 до 0,0020% (среднее 0,0002); в барите от 0,003 до 0,012 (среднее 0,008); во флюорите от 0,0012 до 0,0094 (среднее 0,0053); в пирите от 0,0001 до 0,50 (среднее 0,006); в антимоните от 0,0014 до 0,0200 (среднее 0,0058); в блеклой руде от 0,0040 до 1,84 (среднее 0,050); в сфалерите от 0,0021 до 0,060% (среднее 0,010). В доломите среднее содержание ртути составляет 0,0002%, в антраксолите в 10 раз выше — в среднем около 0,0020%.

Для доказательства наличия в некоторых породах самородной ртути были проведены эксперименты, заключавшиеся в нагревании образцов при температурах в 100, 200, 300 и 450° в течение 8 часов. Таким путем было доказано, что в некоторых надрудных сланцах над крутопадающими согласными рудными зонами среди доломитов ртуть находится в основном в самородном состоянии, так как уже при нагревании до 100° ее содержание уменьшается на одну треть, а при 200° — падает в 4 раза. Значительные количества самородной ртути установлены и в надрудных сланцах над залежами в сводовых частях сжатых антиклиналей. Кроме того, здесь часть ртути находится в пирите; при нагревании свыше 450° в течение 8 часов в пирите сохранилось около 0,0001% ртути. Форма нахождения ртути в пирите пока не установлена. В отличие от указанных случаев, в пробах из месторождений, представляющих пологие залежи, контролирующиеся структурами внутриформационного расслоения, ртуть в основном входит в состав киновари и поэтому улетучивается труднее, чем в первом случае (при 100° теряется 12%, при 200°—47%).

Из приведенных данных вытекает, что ртутные ореолы над рудными залежами являются неоднородными по форме нахождения ртути, которая может присутствовать в виде киновари, в самородном виде или может входить в другие жильные и рудные минералы, характерные для месторожде-

¹ А. А. Сауков. Геохимия ртути. Изд-во АН СССР, М., 1946.

ний и их ореолов. Самородная ртуть чаще всего встречается в углисто-глинистых и мергелистых сланцах над богатыми рудными залежами, образованными, по-видимому, из концентрированных и относительно быстро циркулировавших растворов; этим объясняется ее приуроченность к указанным выше структурам месторождений. Первоначально мной, а затем и другими исследователями было доказано, что в зоне гипергенеза под влиянием процессов окисления киновари и других содержащих ртуть минералов ртуть может частично мигрировать, вновь отлагаясь в форме супергенной киновари или даже самородной ртути.

Этот вывод хорошо подтверждается данными, приведенными В. П. Федорчуком. Им было проведено детальное опробование поверхностных выходов одного из рудных участков ртутного месторождения согласного типа, залегающего в доломитах, и для сравнения — опробование тех же горизонтов, но по анализам проб, взятых по кернам буровых скважин, т. е. по породам, не затронутым процессами выветривания. Сравнение полученных результатов опробования показало, что в процессе выветривания ртуть явно перемещается из доломитов в сланцы и мергели: среднее содержание ртути в неизменных доломитах, по данным 72 проб, составляло 0,00143%, а в перекрывающих сланцах — 0,00045% (среднее из 76 проб). В поверхностных участках, подвергшихся гипергенному изменению, те же самые пробы показали уже существенно иные содержания ртути: в доломитах ее содержание уменьшилось более чем в 4 раза (до 0,00033), а в сланцах возросло примерно на 70%, составив в среднем 0,00075%, причем здесь ртуть присутствует главным образом в самородной форме. Автор считает, что это изменение соотношений можно объяснить предположением, что в процессе гипергенеза происходит образование самородной ртути, которая в силу высокой упругости паров перемещается и сорбируется высокодисперсным углисто-глинистым веществом сланцев. Это объяснение представляется достаточно убедительным, так как оно хорошо согласуется с известными нам особенностями поведения ртути в зоне гипергенеза.

Указанные выше четыре группы ореолов рассеяния выделяются, как было сказано, по генетическому признаку — по форме миграции химических элементов (твердая, жидкая, газообразная, биогенная). В ряде случаев в ореоле наблюдается та же форма нахождения элемента, как и та, в которой он мигрировал (например, минералы в случае механических ореолов, растворы в случае воды и газы в случае газо-

вых ореолов). Но, как мы уже видели, иногда современная форма нахождения элемента существенно отличается от формы его миграции; это наблюдается, например, в случае упомянутых выше ореолов вокруг гидротермальных и пневматолитовых месторождений.

Выделенные выше первичные и вторичные ореолы разного происхождения часто в действительности налагаются друг на друга, что затрудняет их расшифровку. На первичные ореолы, как правило, налагаются вторичные, связанные с разрушением как месторождений, так и их первичных ореолов. На механические ореолы обычно налагаются продукты водного переноса элементов — выделившиеся из растворов соли, сорбированные высокодисперсными частицами механических ореолов катионы и анионы водных растворов и т. д. Иногда существенное участие в формировании указанных ореолов принимают биогенные факторы; они же играют видную роль при образовании водных и газовых ореолов, при невысоких, конечно, температурах. Более подробная характеристика ореолов и потоков рассеяния будет дана несколько позднее, при описании отдельных видов геохимических поисков, основанных на их выявлении и интерпретации.

В связи с рассматриваемой проблемой уместно остановиться на некоторых вопросах номенклатуры и классификации, что необходимо сделать, учитывая новизну самих рассматриваемых вопросов. Н. И. Сафронов выделяет три вида рассеяния: 1) первичное конституциональное; 2) вторичное наложенное; 3) смешанного происхождения.

Первичное конституциональное рассеяние охватывает всевозможные геологические образования (изверженные, осадочные и метаморфические породы) и является сингенетичным с ними. В изверженные породы рассеянные элементы попадают при застывании магм; в осадочные привносятся вместе с кластическим материалом, сингенетичными минералами, а также в результате привноса этих элементов в стадию сингенеза пород. Внутри первичного конституционального вида рассеяния автор выделяет: а) первичный натуральный геохимический фон, характеризующийся содержаниями элементов, равными или близкими к кларковому и б) первичное аномальное площадное рассеяние, характеризующееся содержаниями некоторых химических элементов, в несколько раз превышающими натуральный фон.

Вторичное наложенное рассеяние наблюдается всегда на фоне первичного конституционального рассеяния и часто во много раз превосходит последнее по своей интенсивности.

Это вторичное наложенное рассеяние, в отличие от первичного, сингенетического, является эпигенетическим и связано с различными последующими геохимическими процессами. С точки зрения геохимических методов поисков наиболее важными являются те виды вторичного наложенного рассеяния, которые связаны с формированием или разрушением месторождений и носят локальный характер. Это вторично наложенное локальное рассеяние, связанное с месторождениями, Н. И. Сафронов называет ореолами рассеяния; вторично наложенное рассеяние площадного распространения, непосредственно с месторождениями не связанное, он обозначает термином «ареалы вторичного рассеяния». Примерами подобных ареалов являются иногда подземные и поверхностные воды, рыхлые образования, в том числе почвы, торфяники, растения и т. д. Эти ареалы, как указывалось, с месторождениями не связаны; они обязаны своим происхождением другим разнообразным процессам. Повышенные концентрации ценных элементов, иногда наблюдающиеся в пределах ареалов рассеяния и не связанные с образованием или разрушением месторождений этих элементов, обычно называют ложными аномалиями, противопоставляя им истинные аномалии, каковыми являются ореолы рассеяния, генетически связанные с месторождениями.

Для практических целей Н. И. Сафронов предложил различать механические, солевые и газовые ореолы рассеяния. Механические и газовые ореолы вполне определены и не вызывают сомнений. Что касается солевых ореолов, то, согласно автору, они характеризуются нахождением рассеиваемого вещества в жидкой фазе, в виде водных растворов, преимущественно сульфатных солей, или в виде сорбированных природными сорбентами, или, наконец, в виде составных частей биохимических комплексов (почвы, растительности и т. п.). Формирование и закрепление этих ореолов на местности происходит из водных растворов путем диффузии и капиллярного подъема водных растворов, сорбции катионов тяжелых металлов природными поглощающими комплексами, в результате жизнедеятельности растений и т. д. Как видно из самого определения Н. И. Сафронова, солевые ореолы образуются из водных растворов. Поэтому, если в основу классификации ореолов рассеяния положить генетический принцип и тесно связанную с генезисом форму переноса элементов, тогда эти ореолы было бы и формально и по существу правильно именовать «водными» или «гидрохимическими», так же, как сам автор выделяет на том же основании ореолы механические и

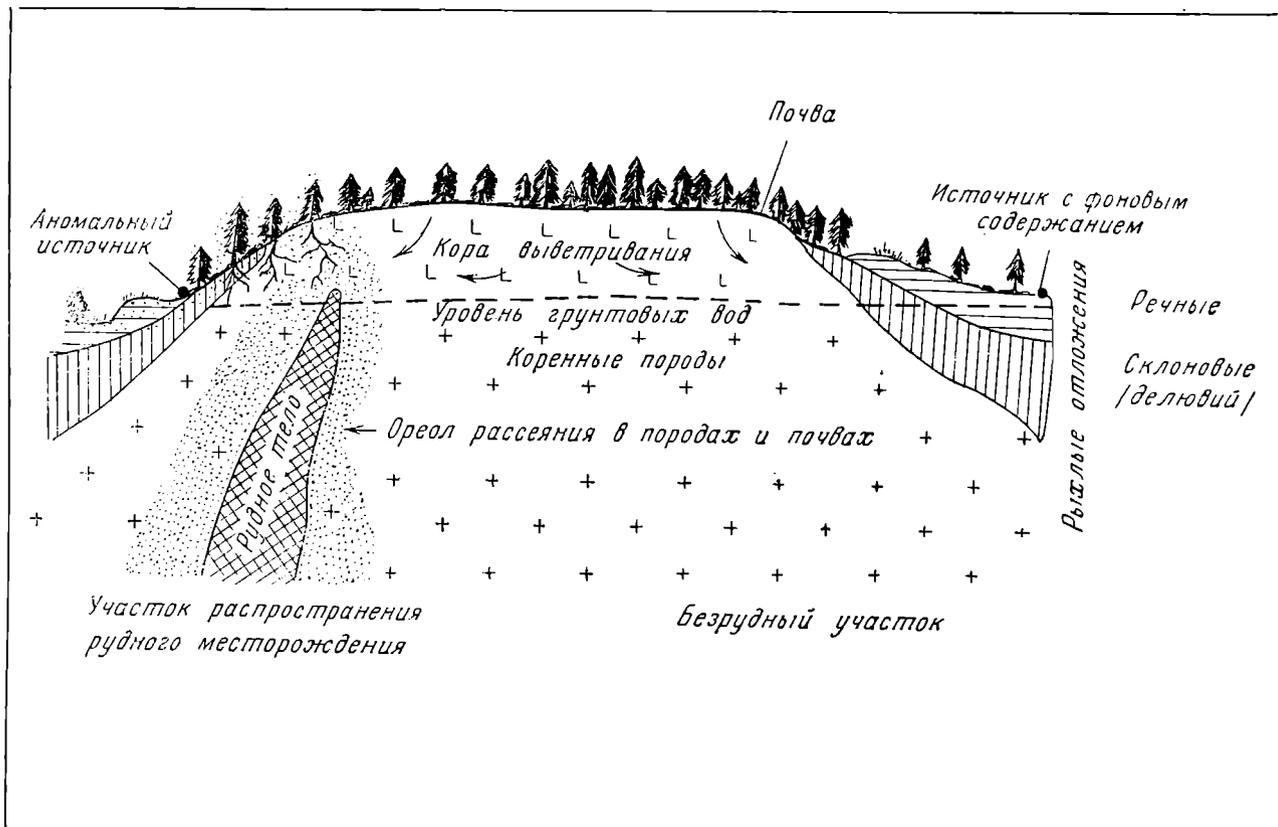


Рис. 1. Геохимические методы поисков (по А. И. Перельману):

Ландшафт на участке рудного месторождения

Ландшафт на безрудном участке

Металлометрические методы

Почва, кора выветривания и континентальные отложения

содержат повышенное (против фонового) количество рудных и сопутствующих им элементов характеризуются средним (фоновым) для данного типа ландшафта содержанием всех химических элементов

Гидрохимические методы

Поверхностные и грунтовые воды

обогащены рудными и сопутствующими элементами характеризуются фоновыми содержаниями

Биогеохимические методы

Организмы, преимущественно растения,

обогащены рудными и сопутствующими элементами характеризуются фоновыми содержаниями

Атмохимические методы

Подземная и частично поверхностная атмосфера

содержит повышенное количество индикаторных газов не содержит повышенных количеств индикаторных газов

газовые. Что касается рассеяний, связанных с организмами, то здесь формы миграции элементов определяются биологическими процессами и их следует выделять в особую группу биогеохимических ореолов рассеяния.

Таким образом, с точки зрения способа миграции химических элементов, результатом которых явились ореолы рассеяния, последние можно классифицировать в следующие 4 группы: 1) механические, 2) гидрoхимические (водные), 3) газовые, 4) биохимические.

Но как уже отмечалось ранее, элементы в ореолах рассеяния могут находиться и часто действительно находятся в формах, отличных от тех, в каких они мигрировали. Классификацию ореолов с точки зрения среды, в которой образуются ореолы, удобно, как и в предыдущем случае, представить также в виде 4 основных групп: 1) ореолы в горных породах, (коренных и обломочных) и в почвах, их В. И. Красников называет литохимическими; 2) ореолы в подземных и поверхностных водах (гидрoхимические); 3) ореолы газовые (атмохимические, по В. И. Красникову) — в подземных атмосферах; 4) ореолы биохимические (биогеохимические) — в растительных и животных организмах.

Задачей геохимических поисков, как уже отмечалось ранее, является выявление ореолов и интерпретация полученных данных. Способы выявления ореолов зависят, естественно, от их особенностей, в первую очередь от форм нахождения элементов, и будут различаться при переходе от одного типа ореола к другому. Поэтому в соответствии с выделенными основными типами ореолов рассеяния можно выделить и четыре группы применяемых сейчас геохимических методов. Это будут методы: литохимические (металлометрические), гидрoхимические, атмохимические и биогеохимические (рис. 1).

Часто одно и то же месторождение данного полезного ископаемого сопровождается ореолами разных типов; очевидно, что при поисках подобных месторождений можно применять разные геохимические методы. Например, в связи с урановыми месторождениями могут одновременно существовать литохимические, гидрoхимические, биогеохимические и газовые ореолы. Поэтому для поисков урановых месторождений можно применить разные геохимические методы; как показала практика, эффективными оказались литохимические (гамма-съемка и др.), газовые (эманационная съемка) и гидрoхимические. Иногда положительные результаты давала и биогеохимия.

Глава 4. МЕТАЛЛОМЕТРИЧЕСКИЕ (ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ) СЪЕМКИ

При металлометрических съемках поиски месторождений полезных ископаемых сводятся к выявлению ореолов рассеяния химических элементов в горных породах, почвах и наносах и к интерпретации полученных результатов. Иногда эти методы называют литохимическими, поскольку они имеют дело с ореолами в литосфере, по аналогии с гидрохимическими и атмохимическими методами, имеющими объектами исследования соответственно гидросферу (воды) и атмосферу (подземные газы).

Металлометрические съемки зародились впервые в СССР в начале тридцатых годов нашего столетия (Н. И. Сафронов, А. П. Соловов и др.) и с тех пор проводятся непрерывно во все возрастающих масштабах, что объясняется большой эффективностью этих методов при поисках разнообразных месторождений полезных ископаемых.

Первоначально под металлометрической съемкой понимали выявление механических ореолов рассеяния, развитых в рыхлых делювиально-элювиальных отложениях; затем были разработаны другие разновидности металлометрических методов, включая опробование коренных пород, аллювиальных отложений и погребенных ореолов. Поэтому в настоящее время можно выделить по крайней мере 4 вида металлометрических поисков.

А. Поиски по открытым ореолам рассеяния в делювиально-элювиальных отложениях и в почвах.

Б. Поиски по потокам рассеяния месторождений в аллювиальных отложениях («метод донных отложений»).

В. Поиски по погребенным ореолам рассеяния.

Г. Поиски по ореолам рассеяния в коренных породах. Применение того или иного из этих методов зависит от ряда обстоятельств, о чем будет сказано несколько ниже.

Металлометрические поиски по открытым ореолам рассеяния в делювиально-элювиальных отложениях

Этот метод зародился у нас первым и наиболее широко и успешно применяется до сих пор. В разработке его теоретических основ и практических приложений особенно много сделал А. П. Соловов, обобщивший имеющийся большой опыт в специальных инструкциях по металлометрической съемке (1951 и 1957 гг.), а также в своей известной монографии «Основы теории и практики металлометрических съемок».

Горные породы и заключенные в них месторождения, будучи выведены на земную поверхность, т. е. в условия, существенно отличные от условий их образования, как известно, подвергаются процессам физического, химического и биологического выветривания. В результате выветривания плотные горные породы и руды в той или иной степени измельчаются, причем меняются не только их физические и механические свойства, но меняется и их минералогический и химический состав. Часть химических элементов при этом переходит в природные растворы, создавая водные ореолы рассеяния; выявление их является объектом гидрогеохимических методов поисков. Но значительная часть химических элементов, особенно если они находились в трудноподвижных формах, при процессах выветривания сохраняется в тех же минералах и горных породах, где они присутствовали и первоначально. Вместе с минералами и породами эти элементы в результате процессов денудации затем механически переносятся и отлагаются, образуя различные типы отложений (делювиальные, аллювиальные, морские и озерные отложения и т. д.). Эти процессы механического переноса минералов, так же как и процессы выветривания, совершаются за счет энергии солнца, определяющей круговорот воды, и за счет сил гравитаций. В результате этих процессов осуществляется нивелировка земной поверхности, нарушаемая горообразовательными процессами, идущими за счет энергии глубин земли.

В миграции продуктов выветривания с высоких мест в более низкие важную роль играет вода. Годовое количество осадков, выпадающих на сушу ($99\ 500\ \text{км}^3$), значительно больше, чем испарение с ее поверхности ($62\ 400\ \text{км}^3$). Разница между этими величинами составляет сток с суши ($37\ 100\ \text{км}^3$).

Вместе с водами переносится с суши в моря и океаны огромное количество взвешенного и растворенного материала; количество взвешенного вещества оценивают примерно в 10 км^3 (по весу около $2,6 \cdot 10^{10} \text{ т}$) в год, а количество растворенных солей — около $2,7 \cdot 10^9 \text{ т}$. Для внутриматерикового стока гидрологи указывают тот же порядок цифр.

В результате эрозионной деятельности рек поверхность суши понижается в среднем на $0,1 \text{ мм}$ в год (в бассейне р. Аму-Дарьи почти в 10 раз быстрее — около 1 мм в год, а в бассейне Волги почти в 20 раз медленнее — около $0,005 \text{ мм}$ в год). В пониженных участках суши в результате твердого стока, как следствие отложения осадков, происходит соответственно повышение уровня.

Указанная миграция химических элементов — в форме устойчивых минералов, переносимых движущимися поверхностными водами, — создает механические ореолы и потоки рассеяния элементов, в том числе россыпи золота, платины, касситерита и других устойчивых минералов, аллювиальные отложения речных долин и т. д. Обломки горных пород и руд иногда переносятся также движущимися ледниками; поэтому морены ледников мы можем рассматривать как один из типов механических потоков рассеяния. Механогенез в широких масштабах осуществляется также силой ветра, особенно в пустынных и полупустынных областях, где отсутствует растительный покров, предохраняющий поверхность от дефляции. Вместе с воздушными массами перемещаются пыль и более крупные частицы в зависимости от скорости ветра. Считают, что для некоторых территорий количество материала, переносимого во взвешенном состоянии ветрами, не меньше, чем количество, переносимое поверхностными водами; так, например, в нижнем течении р. Нила за последние 2600 лет ветром был снесен слой мощностью в $2,5 \text{ м}$, что значительно превышает по интенсивности водную эрозию.

В отличие от транспортирующей деятельности воды и льда, перемещающих горные породы и руды лишь в более пониженные места, ветер способен переносить твердые частицы также и в повышенные участки рельефа; поэтому, например, эоловые отложения лесса мы иногда находим значительно выше мест, откуда были унесены его частицы, а морские соли, перенесенные ветром вместе с брызгами воды, встречаем иногда на суше вдали от океана.

Поскольку при металлометрических съемках приходится иметь дело по преимуществу с рыхлыми отложениями, с которыми связаны ореолы рассеяния элементов, большое зна-

чение при интерпретации аномалий имеет генезис этих рыхлых отложений.

По происхождению рыхлые отложения обычно делят на следующие группы: а) элювиальные, б) делювиальные, в) пролювиальные, г) солифлюкционные, д) аллювиальные, а) моренно-ледниковые.

Элювиальные отложения представляют продукты начальной стадии выветривания коренных пород, оставшиеся на месте своего первоначально-

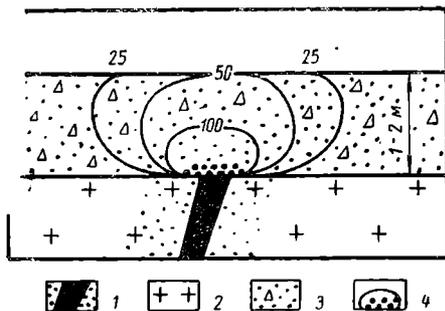


Рис. 2. Схема открытого ореола нормальной интенсивности (по В. И. Красникову):

1 — рудное тело и его первичный ореол; 2 — вмещающие коренные породы; 3 — элювиально-делювиальные (в основном автохтонные) отложения; 4 — вторичный ореол с изоконцентрами рудообразующего элемента в условных единицах

го нахождения, что обычно имеет место при горизонтальном или слабонаклонном положении земной поверхности. В высокогорных, полярных и пустынных условиях, где преобладает физическое выветривание, а химическое отстает от него, элювий представлен обломками мало измененных коренных пород; крупность этих обломков увеличивается с глубиной, поскольку физическое выветривание особенно интенсивно захватывает самые поверхностные горизонты и с глубиной постепенно затухает. В усло-

виях относительно теплого влажного климата интенсивно проявляется химическое и биологическое выветривание, в результате чего верхняя часть элювиальных отложений представлена почвенным покровом, который в химическом и минералогическом отношении уже значительно отличается от коренных пород.

Интерпретация результатов металлотрических съемок по элювиальным отложениям является наиболее простой, поскольку обломки пород практически остались на месте и, следовательно, аномалии в рыхлых отложениях точно отвечают аномалиям и в коренных породах с учетом, конечно, тех изменений, которые внесли в состав пород химические и биологические процессы (рис. 2).

Делювиальные отложения представляют рыхлые продук-

ты выветривания коренных пород, перемещенные по склонам действием силы тяжести и атмосферными осадками. Делювий склонов образуется под влиянием тех же агентов выветривания, что и элювий, и постепенно переходит в него на водоразделах и на глубине, вблизи коренных пород. В практике металлометрических съемок обычно приходится иметь дело с **элювиально-делювиальными** отложениями, т. е. со слабо перемещенными продуктами выветривания, которые по своему положению и составу еще сохраняют связь с материнскими породами, что собственно и позволяет интерпретировать результаты опробования этих отложений. Очевидно, что чем дальше вниз по склону перемещены обломки пород и чем сильнее переработаны они в результате химического и биологического выветривания, тем труднее объяснять результаты металлометрической съемки. При интерпретации результатов следует, конечно, учитывать, что состав делювия в данном пункте опробования отражает состав коренных пород, расположенных выше по склону; необходимо также иметь в виду, что в вертикальном разрезе делювиальные отложения на глубине сменяются элювиальными, а затем коренными породами и, следовательно, в зависимости от глубины отбора пробы более или менее приближаемся к составу коренных пород.

В условиях вечной мерзлоты образуются **солифлюкционные** отложения, обязанные стеканию со склонов грунта, перенасыщенного водой и богатого коллоидами, под влиянием временного оттаивания. Солифлюкция наблюдается уже при углах склона в 3—5°; скорость ее изменяется от нескольких сантиметров до десятков метров в сезон. С ней связано образование земляных рек и шлейфов, солифлюкционных террас и валов.

В группу **пролювиальных** относят отложения временных потоков, образующихся при их выходе из горных долин на равнину, а также отложения конусов выноса в устьях горных рек. Особенно развиты эти отложения в предгорных районах с сухим климатом, где они могут достигать мощности нескольких сотен метров и отличаются большой разнородностью материала по его крупности — от лессовидных суглинков до огромных валунов. Образуются эти отложения обычно в результате сильных паводков, которые часто носят катастрофический характер (например «силевые потоки» в Средней Азии). Состав пролювия в основном отвечает составу тех коренных пород или элювиальных и делювиальных отложений, которые были захвачены временными бурными потоками. Поэтому результаты опробования пролювиальных отложений

можно интерпретировать лишь с обязательным учетом перемещения материала, подобно тому как интерпретируются результаты, например, валунно-ледниковой съемки.

Аллювиальные отложения слагают долины и дельты рек; в горных условиях аллювий состоит из валунов и галек, на равнинах имеет преимущественно песчано-глинистый характер. Мелкие, легкие частицы аллювиальных отложений проходят иногда огромный путь, более крупные, тяжелые перемещаются обычно недалеко, что позволяет, учитывая рельеф, в ряде случаев относительно легко находить коренные породы или месторождения, из которых эти минералы были заимствованы. На этом основана шлиховая съемка — наиболее древний вариант металлометрии.

Моренно-ледниковые отложения перенесены ледниками и оставлены при их отступании. Состав их не отвечает составу пород, которые они перекрывают, что существенно затрудняет проведение поисковых работ на обширных территориях, занятых моренно-ледниковыми отложениями. Использование состава этих отложений в поисковых целях (валунно-ледниковый метод) зависит от дальности переноса материала: если материал перемещался относительно недалеко, что имеет место в горных районах, задача облегчается, если же материал переносился на большие расстояния — десятки и сотни километров, задача существенно усложняется. Интересно отметить, что валуны из апатито-нефелиновой породы Хибин удавалось находить среди моренного материала в окрестностях г. Череповца раньше, чем были найдены апатитовые месторождения; ясно, что интерпретировать эту находку до того, как были открыты указанные месторождения на Кольском полуострове, было весьма трудно.

Помимо рыхлых отложений, коренные породы и заключенные в них месторождения могут быть перекрыты и различными другими осадками — морскими, озерными, вулканогенными, биогенными, эоловыми и т. д. Генетической связи между этими отложениями и залегающими под ними более древними породами и месторождениями, очевидно, нет; однако в результате некоторых эпигенетических процессов, проходящих в тех и других породах, состав подстилающих пород может иногда оказать заметное влияние на перекрывающие его отложения, что может быть отмечено соответствующими геохимическими наблюдениями, в том числе при металлометрическом картировании.

При металлометрических поисках по вторичным ореолам рассеяния, как уже упоминалось выше, имеют дело главным

образом с рыхлыми отложениями, в пределах которых размещаются механические и «солевые» (водные) ореолы рассеяния. Состав этих отложений зависит от ряда условий, в том числе от климата, от состава растворов и газов, которые воздействовали на материнскую породу при ее выветривании, от характера флоры и фауны и от ряда других причин и, что особенно для нас важно, зависит от состава исходной материнской породы; это по существу и определяет возможность по вторичным ореолам рассеяния судить о составе исходных пород и заключенных в них месторождений.

При разрушении месторождений обломки руды при их перемещении смешиваются с обломками пустых пород и, таким образом, в зависимости от пройденного расстояния концентрация искомого элемента будет все более уменьшаться. Но она будет уменьшаться так же и под влиянием других причин: обломки руды при своем движении будут все более измельчаться и все более подвергаться процессам химического и биологического воздействия, в результате чего содержание данного элемента также будет все более уменьшаться. В этом случае уменьшение концентрации будет связано со временем. В общем виде, следовательно, концентрацию элемента в данной точке ореола (C) мы можем представить в виде выражения:

$$C = C_p - C_l - C_t,$$

где C_p — концентрация в рудном теле; C_l — уменьшение концентрации в зависимости от пути (l); C_t — уменьшение концентрации в зависимости от продолжительности миграции механических частиц.

Величины C_l и C_t в пределе стремятся к значению C_p , но никогда его не достигают, так как концентрация элемента в пределах ореола никогда практически не падает до нуля, обычно не опускаясь даже ниже величины натурального фона.

Конечно, все эти рассуждения справедливы до тех пор, пока обломки руды, с которыми мы имеем дело в механическом ореоле, продолжают существовать; если же они полностью разрушаются (в химическом отношении) и искомые элементы переходят, например, в водные растворы, C_t становится равной C_p и содержание элемента в данной точке механического ореола уже не зависит от состава месторождения, а лишь от содержания элемента в более устойчивых породах.

Для случая ореолов рассеяния в элювиальных отложениях расстояние l в идеальном случае равно нулю, т. е. обломки

породы не перемещаются (небольшим перемещением в вертикальной плоскости можно пренебречь). В этом случае величина C_t будет тоже равна нулю; приведенная выше формула упростится и примет такой вид: $C = C_p - C_t$, т. е. концентрация в данной точке ореола (C) будет зависеть лишь от первоначальной концентрации элемента в руде и от выноса части элемента из данной точки в результате процессов выветривания — она будет равна их разности.

Величина C_t , как мы видели, связана с выносом элемента из данной массы вещества, причем она выражается, как всякая концентрация, в процентах. Поскольку выветриванию подвергается вся масса, из нее выносятся не только рассматриваемый нами элемент, но в той или иной степени и все другие. Если вынос других элементов происходит с той же скоростью, как и данного, величина C_t была и остается равной нулю, т. е. первоначальная концентрация элемента в массе вещества не меняется (она остается равной C_p). Но возможен и такой случай, когда концентрация искомого элемента в отдельных точках ореола будет выше, чем она была в самом месторождении; это будет иметь место тогда, когда указанный элемент находится в форме особо устойчивых минералов, которые химически разрушаются значительно труднее, чем другие минералы, слагающие рудные массы и вмещающие породы. С подобным случаем мы встречаемся в россыпях касситерита, монацита, золота и других устойчивых минералов: концентрация их в россыпях может значительно превосходить их содержание в исходных материнских породах. Очевидно, что в данном случае величина C_t в приведенной формуле будет иметь знак плюс, что будет обозначать увеличение концентрации искомого элемента в процессе выветривания.

Приведенные примеры относятся к случаям наиболее устойчивых минералов; значительно чаще рудные минералы являются мало устойчивыми к агентам химического выветривания и поэтому рудные элементы легко удаляются за пределы механического ореола рассеяния; в результате этого с течением времени концентрация искомого элемента в пределах ореола все более и более падает. Это относится, в частности, к наиболее обширной и важной группе сульфидных месторождений, для которых в связи с этим механические ореолы рассеяния не имеют такого важного значения, как, например, водные.

А. П. Соловов, детально анализируя механические ореолы рассеяния, показал, что распределение частиц в ореоле под-

чиняется законам математической статистики, если средние размеры этих частиц очень малы, а количество их в ореоле соответственно бесконечно велико. Он показал, что математическую постановку задачи о распределении частиц в механическом ореоле рассеяния можно свести к отысканию функции распределения вероятностей в зависимости от действующих сил, параметров среды, пространственных координат и времени. Физическая сторона процесса механического рассеяния напоминает задачу о распределении температуры в однородной среде или задачу о диффузии вещества. Для простейшего случая тонкой вертикальной жилы, подвергающейся механическому разрушению (дневная поверхность для простоты принимается горизонтальной), А. П. Солововым предложена такая формула:

$$C_x = \frac{M}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

Здесь C_x — концентрация рудного вещества в данной точке, отстоящей от жилы на расстояние x ; M — суммарное количество рудного вещества в ореоле, распределенное вдоль оси X и равное количеству металла в том же сечении рудного тела до начала выветривания (в метропроцентах — $m\%$), σ — коэффициент рассеяния, зависящий от местных условий.

Из формулы ясно, что максимальное значение C_x будет при $x=0$; в этом случае

$$C_x = \frac{M}{\sigma \sqrt{2\pi}}.$$

Минимальное значение C_x будет на бесконечном удалении от рудной жилы, т. е. при $x = \infty$; в этом случае C_x будет равна нулю, т. е. концентрация элемента, принесенного из рудной жилы, будет бесконечно малой величиной. В действительности, чувствительными современными методами анализа даже и в этом случае искомый элемент в пробе будет обнаружен, но в данном случае речь идет о содержании элемента в пределах натурального фона, не связанного с рассматриваемым случаем выветривания и механического переноса рудного вещества.

Графически указанное распределение концентраций в пределах механического ореола будет изображаться следующей схемой по А. П. Соловову (рис. 3).

В приведенной выше формуле имеется параметр σ — коэффициент рассеяния. Подставляя разные его значения в фор-

мулу (при постоянном M), получим разные формы кривых распределения; при увеличении коэффициента рассеяния форма ореола становится все более пологой, что указывает на постепенное рассеяние частиц рудного вещества в массе продуктов выветривания вмещающих пород; при малом значении σ кривая имеет более крутой вид. Все это хорошо видно из следующего графика (рис. 4).

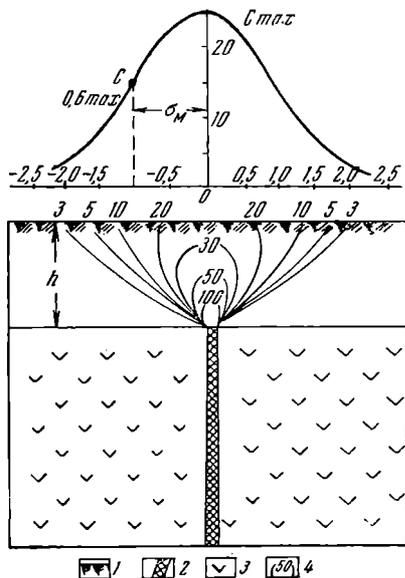


Рис. 3. Механический ореол рассеяния (по А. П. Соловову):

1 — элювий; 2 — рудное тело; 3 — вмещающие породы; 4 — изоконцентраты металла в условных единицах

А. П. Соловов показал, что коэффициент рассеяния имеет ту же размерность, что и расстояние x , т. е. измеряется в тех же линейных единицах (например, в метрах), что он прямо пропорционален «силе» F внешних агентов, определяющих подвижность частиц, прямо пропорционален времени T , прошедшему с момента начала выветривания до начала наблюдения и обратно пропорционален коэффициенту вязкости среды μ , в которой происходит рассеяние рудного вещества.

Математически все это выражается в таком виде:

$$\sigma = \eta \sqrt{\frac{FT}{\mu}}$$

Здесь η — безразмерный коэффициент пропорциональности, зависящий от формы и размера частиц, от их удельного веса, поверхностных свойств и т. д.

Параметр M в приведенной ранее формуле и коэффициент рассеяния связаны между собой определенной зависимостью. Как мы видели, максимальное значение C_x достигается при $x=0$; в этом случае $C_{\max} = \frac{M}{\sigma \sqrt{2\pi}}$, откуда следует, что

$M = C_{\max} \sigma \sqrt{2\pi}$. Если C_x выражается в весовых процентах, тогда M будет выражаться в метропроцентах (по-

сколько σ выражается в метрах), а геометрически будет характеризовать площадь, ограниченную графиком ореола и осью абсцисс.

Совершенно очевидно, что приведенные формулы хотя и выражают сущность явлений, но пока не позволяют количественно выразить ни «силу» F внешних агентов выветривания, ни время T , в течение которого происходило выветривание; не известен и коэффициент η .

Однако качественно эти формулы очень хорошо выражают явления рассеяния и в этом их большая ценность.

Указанный в приведенных выше формулах коэффициент рассеяния σ и суммарное количество металла в ореоле могут быть найдены эмпирически из полевых наблюдений; в этом случае формула распределения приобретает количественное выражение и является весьма ценной при интерпретации результатов металлометрической съемки.

Механический ореол рассеяния изменяется не только в горизонтальной плоскости, но и в вертикальной. Коэффициент рассеяния σ зависит, как мы видели, от параметров F , T и μ , которые с глубиной изменяются. Например, величина продолжительности выветривания T самая большая на поверхности, а с глубиной уменьшается и достигает нуля на границе коренных пород. Действующие «силы» F также убывают с глубиной, поскольку они связаны с колебаниями температуры и влажности, влиянием биогенных факторов и т. д. Что касается коэффициента вязкости μ , то он с глубиной возрастает.

Если учесть все сказанное и обратиться к формуле распределения частиц в ореоле, можно путем соответствующих преобразований показать, что концентрация металла в центральных точках ореола возрастает с глубиной по гипербо-

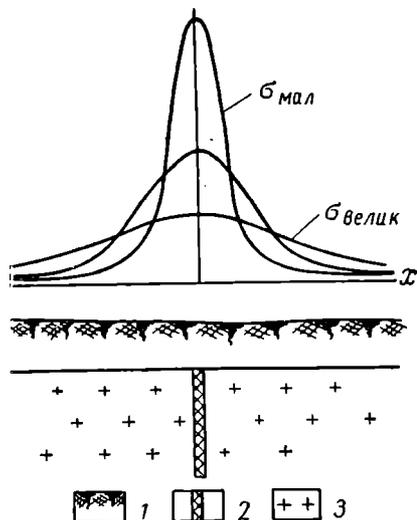


Рис. 4. Форма механических ореолов рассеяния при различных значениях коэффициента рассеяния (σ) и постоянном значении M (по А. П. Соловову):

1 — элювий; 2 — рудное тело; 3 — вмещающие породы

лическому закону, а ореол рассеяния приближенно имеет вид веера, расширяющегося по направлению к дневной поверхности, как это представлено на графике (см. рис. 3).

В механическом ореоле рассеяния в результате разницы в удельных весах отдельных минералов наблюдается гравитационная дифференциация минералов, в результате которой более тяжелые минералы опускаются относительно более легких. А. П. Соловов для оценки роли гравитационной дифференциации минералов в механическом ореоле воспользовался известной формулой Стокса, определяющей скорость падения твердых частиц в жидкости, так как дисперсное вещество ореола в силу огромной продолжительности геологического времени можно уподобить вязкой жидкости.

По формуле Стокса: $V = \frac{2}{9} r^2 g \frac{d_2 - d_1}{\mu}$, где V — скорость падения частицы в жидкости в *см/сек*; r — радиус падающей частицы в *см*; g — ускорение силы тяжести (981 см/сек); d_1 — удельный вес среды; d_2 — удельный вес падающей частицы; μ — коэффициент вязкости среды.

Приняв $r=5 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, $d_1=2,0$, $d_2=7,0$ (касситерит), $\mu=1 \cdot 10^{14}$, можно подсчитать, что за год частица пройдет путь, равный $1 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

Если принять вязкость среды $\mu=1 \cdot 10^{10}$, тогда путь, пройденный частицей за год, возрастает до $1 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, т. е. будет равным средней скорости денудации. Отсюда следует, что на горных склонах, где денудация идет достаточно быстро, эффекта гравитационной дифференциации мы не будем наблюдать; наоборот, в условиях равнин и плоскогорий, где денудация замедленна, нижние горизонты элювия будут заметно обогащаться тяжелыми минералами. Этот вывод подтверждается многочисленными примерами образования богатых элювиальных россыпей тяжелых минералов и относительной редкостью их делювиальных россыпей.

Сравнительная количественная характеристика вторичных ореолов рассеяния достигается подсчетом их продуктивности (в $\text{м}^2\%$) — произведения площади ореола на среднее содержание металла в ореоле (за вычетом местного фона).

Все сказанное необходимо учитывать при интерпретации результатов металлометрических съемок.

При спектральном анализе проб, полученных при металлометрической съемке, мы получаем суммарное количество данных элементов в массе вещества, независимо от форм его нахождения. Во вторичном литохимическом ореоле рассеяния искомые компоненты присутствуют не только в форме рудных

минералов или изоморфных примесей к другим минералам, но также в водных растворах и в сорбированном состоянии.

Хорошо известно, что все рыхлые образования зоны выветривания, даже мерзлые грунты, всегда содержат воду, которая, находясь долгое время в соприкосновении с различными минералами, в том числе рудными, выщелачивает из них разные элементы в соответствии с их растворимостью в данных условиях. Поведение элементов в растворах управляется уже другими законами, чем их поведение в форме минералов. Здесь на первое место выступают физико-химические процессы обмена, диффузии и капиллярного подъема минерализованных растворов, формирующихся в основном в зоне контакта грунтовых вод с рудными телами. Отсюда растворенные в водах рудные элементы частично вместе с растворами путем их капиллярного поднятия поднимаются к дневной поверхности, где в результате испарения воды могут выпасть в форме тех или иных соединений (например, хлористого натрия, гипса, уранованадатов и т. д.). Высота капиллярного подъема, по И. И. Гинзбургу, иногда достигает 10 м. Кроме того, элементы перемещаются в рыхлых породах в результате диффузии, вызванной разностью концентраций элементов; в результате диффузии концентрации элементов в растворах стремятся выравняться.

Растворы в рыхлых отложениях перемещаются также под действием сил гравитации — в направлении истечения грунтовых вод.

В результате перемещения растворов под влиянием тех или иных причин растворенные в них элементы попадают в другие условия (разные рН, разный газовый состав, другие ионы и т. д.); в результате элементы могут выпасть в твердую фазу, образуя соответствующие минералы или сорбируясь высокодисперсными веществами рыхлых отложений. Особенно ярко эти процессы проявлены в зоне окисления сульфидных месторождений; кислые растворы, формирующиеся в пределах рудных тел и обогащенные железом, медью, цинком, свинцом и другими элементами, при своем движении за пределы рудных тел реагируют с окружающими породами и постепенно нейтрализуются, в результате чего образуется своеобразная железная шляпа с гидратами окисного железа, сорбирующего ряд ионов, а также ряд вторичных минералов — гидроокислов, окислов, карбонатов, арсенатов, ванадатов, фосфатов и т. д. Об этом более подробно будет сказано в соответствующей главе.

Рудные элементы в результате выпадения из растворов в

твердые фазы в дальнейшем ведут себя уже как составные части механических ореолов рассеяния, хотя эти фазы являются вторичными по отношению к последним.

Таким образом, механические ореолы рассеяния в элювиально-делювиальных рыхлых отложениях по существу являются сложными, так как представляют результат наложения на собственно механические ореолы последующих солевых ореолов (по номенклатуре Н. И. Сафронова), обязанных выпадению элементов из растворов.

При этом, как правило, роль первой составляющей значительно больше, чем второй, так как процессы перемещения элементов в твердом состоянии играют более значительную роль, чем их перемещение в растворах. Однако это не всегда так; в случае особо хорошо растворимых соединений роль водной миграции во вторичных литохимических ореолах становится весьма значительной, например, когда происходит выветривание сульфидных месторождений, миграция элементов в стороны от месторождений происходит по преимуществу в жидкой фазе; если сульфиды и попадают механическим путем в элювиально-делювиальные рыхлые отложения, то они в них оказываются неустойчивыми, быстро подвергаются процессам окисления, переходят в растворы, мигрируют вместе с ними и при изменившихся условиях выпадают из этих растворов в форме вторичных минералов или сорбируются высокодисперсными составными частями рыхлых отложений (глинами, гидратами окислов, органическими веществами и т. д.). Ясно, что в данном случае роль водной миграции при образовании механического ореола рассеяния очень существенна. Особенно велико практическое значение водной миграции элементов в случаях рыхлых отложений аллювиального происхождения — моренно-ледниковых, эоловых, аллювиальных и других, перекрывающих рудоносные формации. Генетической связи механических ореолов, развитых в этих отложениях, с подстилающими коренными породами нет совсем, но водные растворы из подстилающих пород вместе с растворенными в них элементами могут поступать в рыхлые отложения, налагаемая на них свои вторичные твердую и жидкую фазы, что и позволяет методами металлометрии (или биогеохимии) обнаружить эти ореолы и заключить по ним о залегающих на глубине, погребенных под рыхлыми отложениями месторождениях.

Формирование «солевых» ореолов является более сложным процессом, чем формирование ореолов механических, так как оно зависит не только от механической формы дви-

жения, но также от разнообразных химических и биологических процессов, которые количественно учесть мы пока не можем. Большую роль при этом играют: характер рыхлых отложений, минералогический состав руд, климатические условия и т. д. Особенно значительна роль климата, определяющего характер процессов выветривания и почвообразования, особенности растворов, специфику флоры и фауны и т. д.

Климатические условия имеют прямое отношение к теории и практике металлометрических съемок, определяя такой важнейший их параметр, как глубина отбора проб. Особенно важно различать аридные и гумидные условия, в них гипергенная миграция элементов идет существенно по-разному. В аридных зонах почвы и воды имеют слабощелочную или нейтральную реакцию, поэтому в них слабо растворяются различные металлы и их вынос из верхнего слоя рыхлых отложений практически отсутствует. При металлометрическом опробовании рыхлых отложений в аридных зонах можно поэтому пробы отбирать почти с самой поверхности (с глубины 10—20 см). В гумидных зонах, как известно, почвы и приповерхностные воды имеют обычно слабокислую реакцию, поэтому здесь происходит интенсивное выщелачивание металлов (в том числе железа) из верхних горизонтов почв и рыхлых отложений; примером подобных почв являются наши северные подзолы. Очевидно, что при металлометрическом опробовании подобных рыхлых отложений в гумидных зонах пробы нельзя брать вблизи поверхности, поскольку металлы из них в значительной мере выщелочены; здесь необходимо отбирать пробы с большей глубины — до 40—50 см и более.

В связи с тем что гипергенная миграция элементов определяет в конечном счете характер геохимических методов поисков, которые рационально проводить в данных условиях, весьма интересными и важными с этой точки зрения являются работы А. И. Перельмана и Ю. В. Шаркова по районированию территории СССР по условиям гипергенной миграции элементов.

В основу районирования авторы положили щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные особенности почв и вод, что, как мы знаем, в значительной мере зависит от климата. Дальнейшее деление провинций на области проведено по характеру рельефа. Авторы выделяют на территории СССР следующие провинции (рис. 5).

1. Провинция нейтральных и щелочных почв и вод. Она отвечает аридному климату. В пределах ее выделяются: а) подпровинция сухих степей и пустынь Средней Азии, Ка-

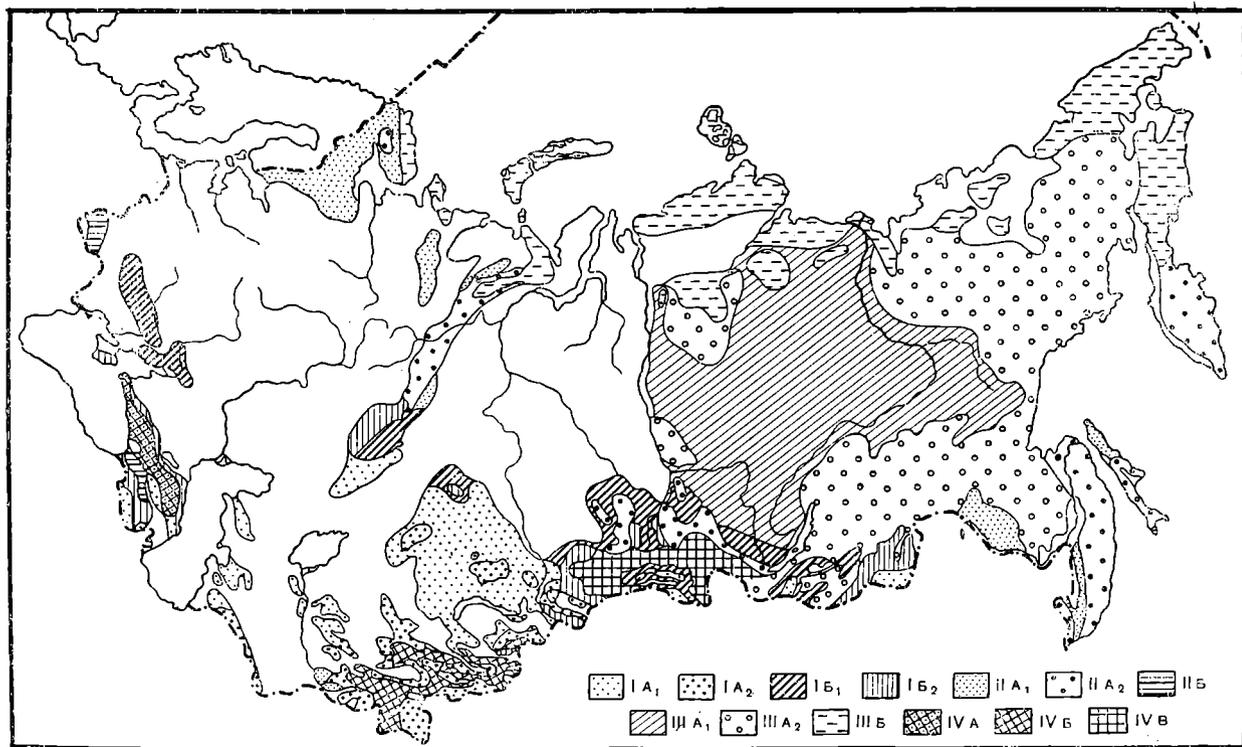


Рис. 5. Схема геохимического районирования по условиям гипергенной миграции элементов (по А. И. Перельману и Ю. В. Шаркову):

I — провинция нейтральных и щелочных почв и вод: IA — подпровинция сухих степей и пустынь Закавказья, Средней Азии, Казахстана и Южной Сибири; IA₁ — равнинные, холмистые и низкорослые области; IA₂ — среднегорные и высокогорные области; IB — подпровинция лесостепей и черноземных степей Украины, Кавказа и Южной Сибири; IB₁ — равнинные и холмистые области; IB₂ — горные области; II — провинция кислых и нейтральных почв и вод; IIA — подпровинция тайги европейского Севера, Урала, Сибири и Дальнего Востока; IIA₁ — равнинные и холмистые области; IIA₂ — горные области; IIB — подпровинция лесных гор Карпат и Малого Кавказа; III — провинция кислых и нейтральных почв и вод с широким развитием вечной мерзлоты; IIIA — подпровинция тайги Восточной Сибири; IIIA₁ — равнинные и холмистые области и плато; IIIA₂ — горные области; IIIB — подпровинция тундры европейского и азиатского Севера; IV — провинция с резко выраженной вертикальной геохимической зональностью почв, вод и коры выветривания; IVA — подпровинция Кавказская; IVB — подпровинция Среднеазиатская; IVB — подпровинция Алтайско-Саянская.

захстана, Южной Сибири и Закавказья, характеризуется весьма слабой миграцией металлов в гипергенных условиях; б) подпровинция лесостепей и черноземных степей Украины, Кавказа, Казахстана и Южной Сибири. В пределах этой подпровинции климат более влажный и поэтому миграция элементов идет более интенсивно, в связи с чем наблюдается заметный вынос подвижных элементов из приповерхностного слоя рыхлых отложений. Как известно, для пустынь и сухих степей характерным является образование солончаков и солонцов за счет капиллярного подъема неглубоко залегающих грунтовых вод и их испарения на поверхности, причем содержащиеся в них соли выпадают в осадок. Таким путем иногда происходит обогащение поверхности некоторыми рудными элементами, например ванадием, ураном и т. д., причем создаются ложные геохимические аномалии над участками, где месторождений этих элементов совсем нет.

II. Провинция кислых и нейтральных почв и вод. Она расположена в пределах гумидной зоны и характеризуется обилием органических веществ в водах и почвах, что вызывает их кислую реакцию и высокую подвижность многих элементов, в результате чего последние выносятся из верхнего слоя рыхлых отложений с образованием характерных подзолистых и других выщелоченных почв.

Эта провинция по климатическим условиям авторами делится на две подпровинции: а) подпровинция тайги европейского Севера, Урала, Сибири и Дальнего Востока; б) подпровинция лесных гор Карпат и Малого Кавказа.

III. Провинция кислых и нейтральных почв и вод с широким развитием вечной мерзлоты. Эта провинция характеризуется также гумидными условиями, но от предыдущей отличается широким развитием вечной мерзлоты (тундры европейского и азиатского Севера, горные области и плато Восточной Сибири). Вечная мерзлота накладывает свой специфический отпечаток на характер гипергенной миграции элементов, значительно замедляя ее, но не прекращая совсем. Важно отметить, что в вечномерзлых грунтах вода не вся находится в форме льда, а в некоторой своей части и в жидком виде. Это объясняется тем, что замерзание капиллярной воды в рыхлых породах происходит при довольно низких температурах, в зависимости от диаметра капилляров, так при $d=0,24$ мм — при $-13,6^\circ$, а при $d=0,06$ мм — при $-18,5^\circ$. Эти температуры значительно ниже, чем средние температуры в мерзлых грунтах (-5° , -6°). Геохимические поиски в указанных условиях производить затруднительно.

IV. Провинция с резко выраженной вертикальной геохимической зональностью почв, вод и коры выветривания. Сюда авторы относят высокие горы Кавказа, Средней Азии, Алтая и Саян. В пределах этой провинции действительно наблюдается ярко выраженная высотная зональность вод, почв и коры выветривания, которая в схеме хорошо повторяет зональность широтную. Например, в Средней Азии высокие части гор характеризуются суровым климатом, морозным выветриванием и отсутствием растительности, что сближает их с Крайним Севером, средняя часть гор отвечает влажному умеренному климату, свойственному лесной зоне, а подножия гор расположены в аридной пустынной зоне, свойственной большей части территории Средней Азии.

А. И. Перельман, анализируя влияние климата на геохимические процессы, показал, что в основном это влияние осуществляется косвенно — через растительные и животные организмы, развитие которых теснейшим образом связано с климатом¹. При этом растительный покров и связанный с ним животный мир играют решающую роль в биологическом круговороте и в гипергенной миграции элементов: чем больше воспроизводится живого вещества, тем интенсивнее идут биологические процессы и тем активнее протекает миграция химических элементов в зоне гипергенеза.

В пределах СССР при движении с севера на юг в соответствии со сменой климатических условий последовательно сменяются следующие ландшафтные зоны: а) тундровая, б) лесная, в) степная и г) пустынная.

Тундровая зона характеризуется суровым климатом, продолжительной зимой и коротким прохладным летом. Растительность скудная: лишайники, мхи, травы; южнее к ним присоединяются кустарники и деревья, это — лесотундра. Физическое выветривание здесь резко преобладает над химическим и биологическим, поэтому возвышенные участки и склоны гор покрыты свежими обломками горных пород, низины обычно заболочены. Для этой зоны характерно наличие вечной мерзлоты, которая начинается уже на небольшой глубине под моховым покровом.

Для визуальных поисков долины и плоские места неблагоприятны, так как первые заболочены, вторые задернованы. Но на склонах гор, изучая осыпи мало измененных пород, относительно легко простым наблюдением обнаружить выхо-

¹ А. И. Перельман. Геохимия ландшафта. Географгиз, М., 1961.

ды месторождений. Таким путем были найдены, например, многочисленные месторождения в Хибинских и Ловозерских тундрах. Растительный покров, развитый в тундровой зоне, не мешает проведению геофизических и геохимических методов поисков.

Лесная зона расположена в умеренном климате и характеризуется обычно относительно влажным теплым летом и холодной зимой. Количество выпадающих осадков превышает испарение, отсюда интенсивное промывание рыхлых отложений. На севере зоны широко развиты болота и глеево-подзолистые почвы; в средней полосе — хвойные леса с подзолистыми почвами, на юге — смешанные леса и дерново-подзолистые почвы. Условия в лесной зоне весьма неблагоприятны для визуальных поисковых работ (густая растительность, задернованность и заболоченность).

Степная зона разделяется на 2 подзоны: а) северную, черноземную подзону степей и лесостепей и б) южную подзону сухих степей с каштановыми почвами. В черноземных степях климат сухой, континентальный, с жарким летом, прохладной зимой и годовым количеством осадков около 300—450 мм. Растительность северных степей травяная (ковыль), иногда (на песках) встречаются сосновые боры. Рельеф в основном равнинный.

Южная подзона сухих степей отличается еще большей континентальностью и меньшим количеством осадков (250—300 мм). Растительность полынно-злаковая; широко распространены солонцы. Недостаток влаги лимитирует биологические и геохимические процессы, в связи с этим миграция элементов по профилю почв незначительна. Растительный покров иногда мешает визуальным поискам, но не препятствует проведению металлометрических и биогеохимических поисков.

Пустынная зона отличается сухим климатом и резким недостатком влаги, за исключением короткого весеннего периода, когда влаги достаточно и быстро развивается растительный покров, в остальное время биологические процессы протекают в пустынях крайне медленно. Растительный покров пустынь настолько ничтожен, что никогда не является препятствием для визуальных поисков; наоборот, произрастающие в пустынях растения с длинной корневой системой могут использоваться при биогеохимических поисках месторождений, перекрытых рыхлыми, чаще всего эоловыми отложениями.

Металлометрические поиски по потокам рассеяния в аллювиальных отложениях (метод донных отложений)

Эта разновидность металлометрических поисков зародилась относительно недавно (в 1950 г.) в работах сотрудников ВИРГ'а под руководством Н. В. Квашневской; аналогичные работы проводились и рядом других организаций, в том числе группой сотрудников ВИТР'а под руководством В. В. Поликарпочкина.

В настоящее время этот метод достаточно зарекомендовал себя как один из ведущих геохимических методов при предварительных поисках на больших площадях и при геологических съемках мелких и средних масштабов, особенно в горных районах с хорошо развитой гидросетью. Потоки рассеяния месторождений в гидросети образуются в результате выветривания этих месторождений, переноса рудных компонентов механическим путем или в растворенном состоянии в гидросеть и отложения их в ее пределах механическим путем или в результате сорбции высокодисперсным веществом аллювия.

Совершенно очевидно, что концентрация рудных минералов в потоке рассеяния будет зависеть от ряда причин, особенно от количества этих минералов, поступающих в гидросеть при выветривании месторождений, что в свою очередь зависит от размеров месторождений и богатства его руд, от устойчивости рудных минералов к агентам выветривания, от интенсивности процессов механического разрушения окружающих пород, а также и от общей площади бассейна денудации, с чем связано разубоживание рудного вещества обломками пустых пород. Те же условия справедливы и для случая миграции полезных компонентов в жидкой фазе; здесь присоединяются лишь дополнительные условия: относительно хорошая растворимость этих элементов, устойчивость растворов и наличие минеральных или органических сорбентов, способных извлекать элементы из жидкой фазы.

Аллювиальные россыпи касситерита, вольфрамита, киновари, золота, платины и других устойчивых минералов являются примерами потоков рассеяния, образованных устойчивыми минералами. Для поисков их издавна применяется шлиховой метод — родоначальник металлометрии. Многие гидрогенные элементы находятся в потоках рассеяния в сорбционных формах (Cu, Zn, Pb, U, Mo и т. д.). Потоки рассеяния лучше прослеживаются в небольших речках и логах, чем в крупных реках, где рудный материал быстро разубоживается огромным количеством продуктов выветривания.

В. В. Поликарпочкин с сотрудниками показал на ряде примеров для Восточного Забайкалья, что потоки рассеяния полиметаллических месторождений имеют двухчленное строение. Верхняя часть потока, примыкающая к месторождениям, характеризуется более высоким и неравномерным содержанием рудных элементов, что обусловлено слабой перемешанностью кластического материала. Нижняя часть потока располагается за пределами месторождений; здесь рудный материал значительно измельчается и разбавляется обломками пустых пород, в результате чего концентрация рудного вещества, по сравнению с головной частью, значительно уменьшается и выравнивается: вниз по течению содержание рудных компонентов постепенно уменьшается до уровня натурального фона. Протяженность потока для рудных компонентов, переносимых тем или иным путем, обычно измеряется величиной от сотен метров до нескольких километров, в зависимости от миграционных свойств элементов. Сорбционные потоки рассеяния образуются часто там, где подземные воды, дренирующие месторождение, выходят на поверхность и поступают в открытые водотоки — на склонах долин и террас, в поймах, в руслах рек. При этом поток рассеяния может быть удален на значительное расстояние от месторождения или его первичного ореола, что, конечно, будет затруднять расшифровку обнаруженных аномалий. Задача еще больше усложняется в том случае, когда указанные подземные воды дренировали месторождение, не выходящее на поверхность (скрытое или перекрытое). При проведении поисков по потокам рассеяния производится систематическое опробование илисто-глинистой фракции аллювиальных отложений по сетке, согласно утвержденной инструкции.

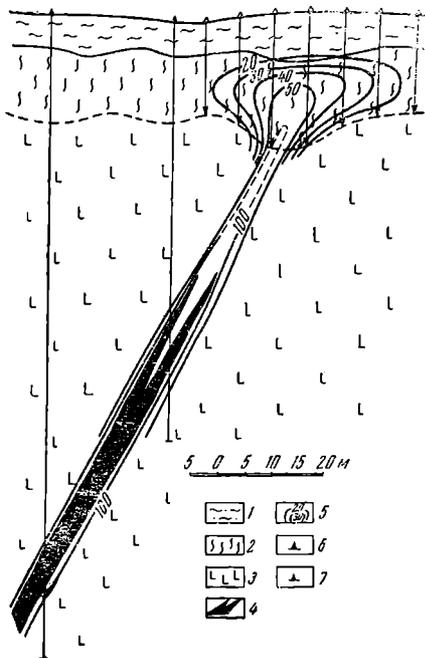
Преимуществами метода «донных отложений» перед металлометрией по ореолам рассеяния являются высокая производительность работ, связанная с возможностью быстрой оценки обширных площадей по небольшому числу проб, и возможность рационального сочетания этого метода со шливовым опробованием и гидрогеохимическими поисками.

Металлометрические поиски по погребенным ореолам рассеяния

Если ореол не выходит на дневную поверхность, а перекрыт более молодыми рыхлыми отложениями, обнаружить его методами металлометрии можно лишь в том случае, если пробы будут отбираться с достаточной глубины. Для этого необходимо путем проходки специальных скважин опробо-

вать нижний слой рыхлых отложений и залегающие под ними выветрелые коренные породы; это позволит обнаружить погребенные вторичные литохимические ореолы.

Для производства глубинных геохимических поисков сконструированы специальные самоходные агрегаты, обеспечивающие скоростную проходку скважин (шпуров) и отбор проб с глубины до 24 м (гидропогружатель СУГП-10).



За последние годы с помощью таких агрегатов начаты глубинные геохимические поиски в ряде районов.

Пример обнаруженного такими съемками рудопоявления редких металлов и его погребенного вторичного ореола рассеяния в древней коре выветривания показан на рис. 6. Грибообразная форма погребенных ореолов рассеяния хорошо согласуется с теоретическими представлениями о процессах их образования.

Площади, перекрытые молдами рыхлыми отложениями (аллювиальными, пролювиальными, моренными, эоловыми) мощностью более 25 м, на территории СССР весьма обширны и пока остаются недоступными для обычных металлометрических поисков, не предусматривающих бурение. Особенно остро стоит вопрос о выявлении погребенных ореолов рассеяния в пределах уже выявившихся

Рис. 6. Вертикальный разрез погребенного вторичного ореола рассеяния рудопоявления редких элементов (по А. Н. Еремееву и А. П. Соловову, 1962):

1 — перекрывающие четвертичные отложения; 2 — глинистая кора выветривания; 3 — рудовмещающие породы полевоза; 4 — рудное тело; 5 — изоконцентрации в условных единицах; 6 — скважины колонкового бурения; 7 — шпур, пройденный СУГП-10

рудных полей и на флангах разведываемых и эксплуатируемых месторождений, поскольку с этим связан практически важный вопрос о расширении сырьевой базы уже действующих предприятий. Поэтому очень важной задачей является создание специально приспособленных для указанной цели

высокопроизводительных буровых станков; при наличии их бурение можно значительно ускорить и удешевить, что позволит проводить поиски месторождений по погребенным ореолам рассеяния в неизмеримо более широких размерах, чем они проводятся сейчас.

Глубинные металлометрические поиски под чехлом рыхлых отложений часто в ряде районов ориентируются на обнаружение ореолов рассеяния в древних корях выветривания. Эти коры пользуются весьма широким распространением в разных районах разных стран; их образованию особенно способствовали жаркие влажные климаты прошлого и относительно спокойная тектоническая обстановка на обширных выровненных поверхностях. В процессе выветривания из кор выносятся большая часть рудных элементов (медь, свинец, молибден, уран, мышьяк и т. д.); наоборот, железо, алюминий, марганец, титан, ванадий и некоторые другие элементы в корях накапливаются. То же самое наблюдается и в корях над рудными месторождениями. Особенно интенсивно эти процессы протекают в верхних частях кор выветривания, обычно представленных глинами. В результате перемещения элементов происходит расширение вторичных ореолов в корях выветривания, по сравнению с первичными, иногда на десятки метров, что имеет большое поисковое значение.

Вторичные ореолы в остаточных корях выветривания являются важными поисковыми признаками месторождений. Если эти коры выходят непосредственно на поверхность, то обнаружение заключенных в них ореолов осуществляется обычными методами поверхностной металлометрической съемки; если эти ореолы перекрыты чехлом молодых отложений — они вскрываются буровыми скважинами. Состав коренных пород и заключенных в них месторождений лучше отражается в составе самых нижних горизонтов кор выветривания (дезинтегрированная или щебенистая часть кор выветривания). Однако вскрытие этих горизонтов связано с дополнительными затратами. Поэтому важно научиться интерпретировать результаты металлометрии кор выветривания и по данным для более верхних их горизонтов, прибегая к вскрытию глубоких горизонтов лишь выборочно, в целях проверки сделанных заключений.

Если мощность экранирующих аллохтонных отложений относительно невелика (до 5—10 м), верхние горизонты их могут иногда обогащаться рудными элементами за счет капиллярного подъема и диффузии растворов, а иногда также посредством корневой системы растений (рис. 7). В этом слу-

чае поиски возможно вести методами обычной металлометрии, отбирая пробы вблизи поверхности. Однако, как показал имеющийся опыт, лучшие результаты и в этом случае, а осо-

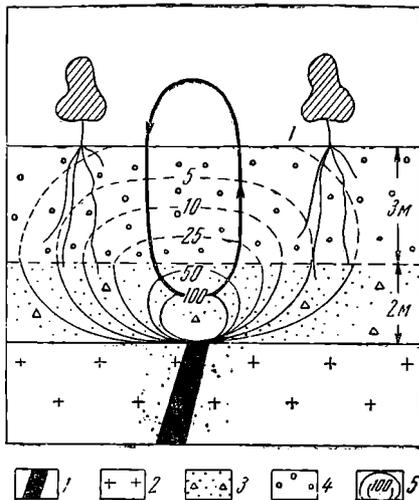


Рис. 7. Схема вторичного ореола, резко ослабленного у дневной поверхности за счет разубоживания аллохтонным материалом (по В. И. Красникову):

1 — рудное тело и его первичный ореол; 2 — коренные породы; 3 — автохтонные рыхлые отложения; 4 — аллохтонные рыхлые отложения; 5 — изолинии равных содержаний рудообразующего элемента в ореоле в условных единицах

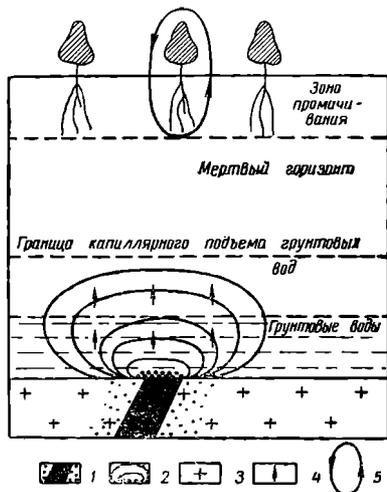


Рис. 8. Схема неглубоко погребенного ореола рассеяния (в условиях аридной зоны, по В. И. Красникову):

1 — рудное тело и его первичный ореол; 2 — погребенный ореол рассеяния; 3 — коренные породы; 4 — перемещение рудообразующих элементов в результате диффузии и капиллярного подъема; 5 — биогенный круговорот элементов в зоне промачивания

бенно когда мощность рыхлых отложений еще больше, дает глубинная металлометрия, позволяющая вскрыть погребенные ореолы (рис. 8).

Поиски по ореолам рассеяния в коренных породах

В коренных породах могут образовываться как сингенетические, так и эпигенетические ореолы рассеяния элементов; первые образуются одновременно с месторождениями и в результате тех же причины, эпигенетические ореолы образуются позднее, в результате разрушения месторождений. Вполне естественно, что вторичные литохимические ореолы обычно налагаются на первичные, и поэтому иногда трудно решить,

с какими ореолами в действительности мы имеем дело, особенно если эти ореолы не представлены видимыми невооруженным глазом минералами. В большинстве случаев этот вопрос, правда, не имеет особого практического значения, поскольку для поисков месторождений пригодны как первичные, так и вторичные ореолы. В общем, сравнивая все разновидности металлометрического метода поисков, можно сказать, что поиски по ореолам рассеяния в коренных породах являются наиболее надежными, так как в этом случае значительно легче интерпретировать результаты съемок, поскольку ореолы практически не смещены. Однако у этого метода имеется один существенный недостаток, мешающий широкому его внедрению,— это трудность отбора и измельчения большего числа проб, необходимых для металлометрической съемки в коренных породах, что удорожает сам метод.

Ореолы в коренных породах могут быть выявлены систематическим опробованием коренных пород по специально разработанной сетке. Опробуются в первую очередь такие участки, которые наиболее благоприятны для формирования ореолов, т. е. для движения растворов и газов: зоны тектонических нарушений, трещиноватости и брекчирования, зоны гидротермально измененных пород и т. д.; в осадочных породах необходимо также опробовать в первую очередь продуктивные фации.

Как первичные, так и вторичные литохимические ореолы в коренных породах распространяются иногда достаточно далеко от рудных тел (сотни метров) (рис. 9), в связи с этим поиски в коренных породах по ореолам рассеяния особенно перспективны тогда, когда требуется обнаружить нескрытые эрозионным срезом глубинные месторождения (рис. 10). Выявленные путем опробования коренных пород литохимические ореолы подвергаются затем проверке соответствующими горными работами с целью выявления самих коренных месторождений.

При проведении указанных металлометрических работ и интерпретации их результатов необходимо учитывать следующие обстоятельства.

Прежде всего следует иметь в виду, что содержание химических элементов в ореолах среди коренных пород может в поверхностных частях этих ореолов существенно изменяться под влиянием гипергенных процессов. Чаще всего эти процессы влекут за собой уменьшение концентраций в силу общей тенденции к их выравниванию, иногда при этом отдельные рудные элементы могут накапливаться, если, напри-

мер, они представлены устойчивыми к процессам выветривания минералами.

И. И. Гинзбург привел данные для отдельных рудных элементов в образцах скарнов, взятых на поверхности и из кер-

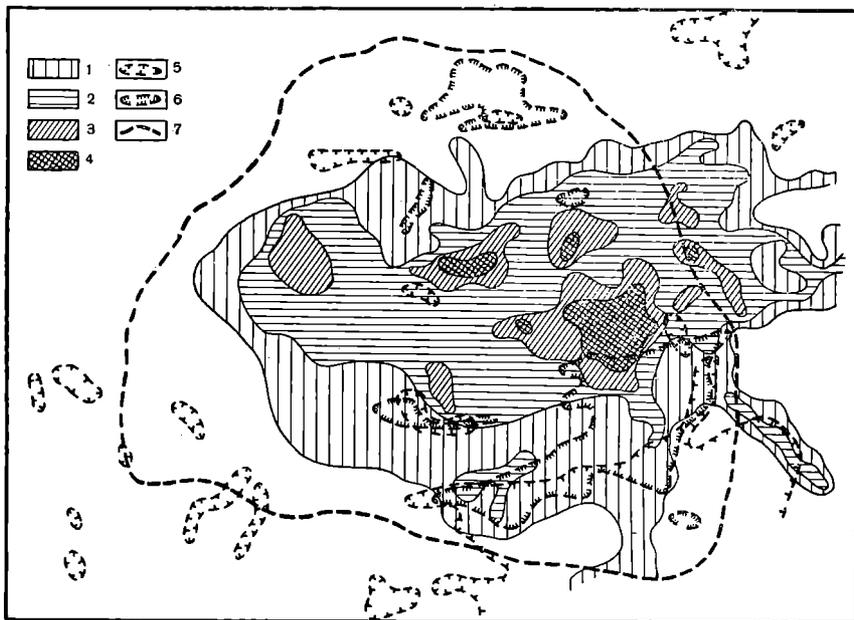


Рис. 9. Ореол рассеяния штокверкового месторождения вольфрама (по С. Д. Миллеру):

1—4 — содержание вольфрама в ореоле: 1—0,005—0,01%; 2—0,01—0,02%; 3—0,02—0,04%; 4—0,04—0,3%; 5—контуры ореолов рассеяния свинца с содержанием 0,1—0,15%; 6—контуры ореолов рассеяния меди с содержанием 0,07—0,3%; 7—контуры распределения контактово и гидротермально измененных пород

нов скважин. Из этих данных следует, что свинец в скважинах был обнаружен примененными методами анализа в 62% случаев, а на поверхности — лишь в 18% случаев. Для цинка подобные же данные оценивались в 88 и 38%; для серебра — 83 и 67%; для висмута — 80 и 38%; для молибдена — 90 и 48%.

Во всех приведенных случаях наблюдалось обеднение поверхности указанными элементами. Лишь в случае вольфрама наблюдалось небольшое повышение концентрации у поверхности (99% случаев), по сравнению с глубиной (94%).

Хотя эти данные и носят несколько условный характер, так как чувствительность методов анализа для разных эле-

ментов разная и не указаны абсолютные величины содержаний, тем не менее общую тенденцию для данного случая они отмечают правильно. Конечно, большое значение при этом имеет форма нахождения изучаемых элементов: если они находятся в легкоподвижных формах, то при процессах выветривания они будут по преимуществу выноситься; если элементы присутствуют в форме минералов, более устойчивых к агентам выветривания, чем основная масса минералов вмещающих пород, тогда будем наблюдать обратную картину — обогащение поверхности рудными элементами.

Приведенные выше данные И. И. Гинзбурга можно объяснить, предположив, что свинец, цинк, серебро, висмут и молибден присутствовали в скарнах в форме сульфидов, которые при выветривании пород на поверхности перешли под влиянием кислорода в более легкоподвижные сульфаты и были в таком виде частично вынесены из верхних горизонтов скарнов. Вольфрам, возможно, присутствовал в форме шеелита или вольфрамита — минералов, довольно устойчивых к агентам выветривания.

Обогащение поверхности коренных пород некоторыми рудными элементами иногда может быть связано и с другими причинами, например с капиллярным подъемом растворов и испарением на поверхности воды, а также с сорбционными явлениями, примером которых могут являться марганцевые корки на поверхности, обогащенные свинцом, гидраты железа, обогащенные медью, ураном и рядом других элементов и т. д. Конечно, подобные случаи обогащения поверхности рудными элементами или их спутниками являются благоприятным обстоятельством, облегчающим металлотермические поиски. Но при этом необходимо

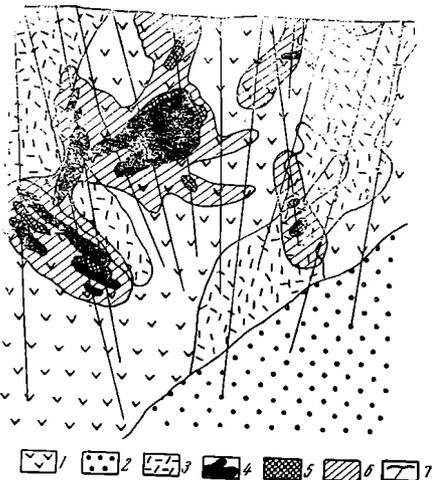


Рис. 10. Первичный ореол гидротермального месторождения, характеризующегося сложной морфологией рудных тел (линзы, гнезда, столбобразные и другие залежи в структурах пересечения):

1 — фельзиты; 2 — песчаники; 3 — туфы фельзитов; 4 — промышленные рудные тела; 5 — забалансовые руды; 6 — первичный ореол; 7 — буровые скважины

учитывать, что довольно часто подобные обогащения на поверхности могут и не быть связанными с залегающими на глубине рудными телами, а могут быть обусловлены местными процессами концентрации из фоновых содержаний элементов в породах, т. е. являются ложными аномалиями, способными лишь ввести в заблуждение. Задача отбраковки ложных аномалий от истинных является одной из важнейших задач поисковой геохимии.

Большое значение для интерпретации данных металлометрической съемки в коренных породах имеют размеры ореолов рассеяния. Первичные ореолы постмагматических, в том числе гидротермальных месторождений, развиваются главным образом по зонам тектонических нарушений, трещиноватости и брекчирования, т. е. в направлении рудоконтролирующих структур. Размеры этих ореолов в подобных условиях часто достигают по вертикали нескольких сотен метров. При отсутствии подобной обстановки ореолы, очевидно, будут значительно меньше. Существенную роль играет характер вмещающих пород: их состав, пористость, трещиноватость.

Е. И. Долманова показала, что оловянная и вольфрамовая рассеянная минерализация распространяется в коренные породы до 400 м от интрузива гранит-порфиров; ореол рассеяния фтора превышает 1000 м, для бора достигает 500 м.

Д. С. Коржинский считает, что при диффузионном метасоматозе в глубинных условиях гранито-гнейсовых комплексов элементы распространяются до нескольких десятков метров от рудного тела; биметасоматические скарновые зоны обычно имеют мощность в несколько метров, хотя иногда она возрастает до 40 м.

Для разных элементов размеры полей рассеяния являются разными; особенно они велики у таких легкоподвижных элементов, как ртуть, мышьяк, молибден, фтор, бор, иод и др. Это объясняется тем, что в условиях образования глубинных месторождений, т. е. при высоких температурах, эти элементы переносятся преимущественно в газообразном состоянии и поэтому обладают максимальной миграционной способностью. Особенно показательна в этом отношении ртуть. Упругость ее паров, как известно, быстро повышается с ростом температуры.

Исходя из этого, а также учитывая, что металлическая ртуть легко образуется в природе при различных реакциях, в том числе при диссоциации киновари, мной в свое время было высказано предположение, что в момент образования

было показано, что в пределах ореолов около ртутных месторождений содержание ртути варьирует в пределах $n \cdot 10^{-4}$ — $n \cdot 10^{-3}\%$, в то время как за пределами ореолов на безрудных площадях оно близко к кларку для земной коры ($7 \cdot 10^{-6}\%$). В пределах рудных полей концентрация ртути в ореолах зависит от глубины залегания рудных тел; если эти тела залегают неглубоко, содержание ртути в ореоле на по-

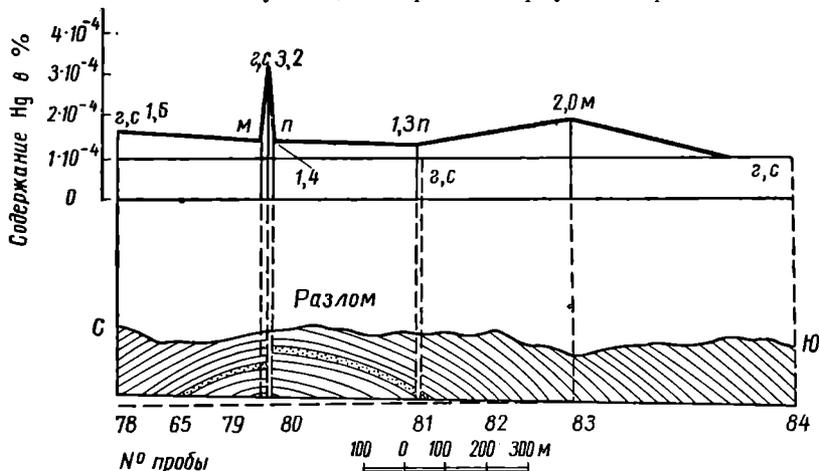


Рис. 12. Казардикамское ртутное месторождение (профиль по Главному ручью)

верхности достигает тысячных и даже сотых долей процента; если рудные тела залегают на глубине 500—800 м, содержание ртути на поверхности составляет обычно стотысячные или первые десятитысячные доли процента. Эти закономерности особенно хорошо иллюстрируются при изучении кернов буровых скважин. Содержание ртути закономерно возрастает при приближении к рудному телу.

В пределах ореолов над сурьмяным месторождением Кадамджай содержания ртути также являются повышенными — примерно на 1—2 порядка по сравнению с натуральным фоном, закономерно возрастающая при приближении к рудным залежам.

На полиметаллических месторождениях Средней Азии также были установлены ртутные ореолы рассеяния, в пределах которых содержания ртути превышали натуральный фон в несколько раз, варьируя от $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-5}\%$, причем эти ореолы оказались значительно более широкими, чем ореолы свинца, цинка, сурьмы, кадмия и серебра, они дости-

гают 1—2 км вкрест простираения, что превышает в 15—20 раз ширину рудных зон. Кроме того, было доказано, что содержание ртути над дорудными и интратрудными разломами обычно значительно выше, чем вне их, причем это относится не только к ртутным, но также к сурьмяным и полиметаллическим месторождениям.

Широкой миграции ртути в парообразном состоянии способствует и то важное обстоятельство, что все известные в природе ее соединения являются при повышенных температурах мало устойчивыми и легко разлагаются с образованием элементарной ртути, поэтому фронт газовой ртутной атмосферы продвигается довольно далеко от рудных тел. Другие упомянутые выше легколетучие элементы в этом отношении отличаются от ртути. Например, фтор в форме своих газообразных соединений будет перемещаться лишь до тех пор, пока не встретит кальций, с которым образует достаточно устойчивый по отношению к температуре флюорит. Поэтому, если иногда фтор и встречаются достаточно далеко от материнской интрузии, то это объясняется уже переносом его не в газообразной фазе, а в водных растворах, по преимуществу в виде фторидов щелочей или щелочных земель.

Первичные ореолы рассеяния при их разрушении на поверхности под влиянием процессов выветривания могут давать вторичные ореолы в почвах и грунтовых водах. Интересны в этом отношении исследования А. Г. Дворникова и В. Я. Петрова, касающиеся распределения ртути в почвах над некоторыми полиметаллическими рудопроявлениями. Нагольного Кряжа. Полиметаллические рудопроявления указанного района располагаются вдоль антиклиналей; они приурочены обычно к куполовидным их частям и тектоническим нарушениям среди осадочных пород нижнего и среднего карбона, представленных глинистыми и песчано-глинистыми сланцами и песчаниками. В рудных жилах встречаются: сфалерит, галенит, пирит, бурнонит, тетраэдрит, буланжерит и другие минералы; среди жильных минералов преобладают кварц и анкерит.

Минералы рудных жил и вмещающие породы характеризуются повышенным содержанием ртути: в блеклых рудах, сфалеритах, бурнонитах и анкеритах содержание ртути составляет несколько десятитысячных долей процента ($n \cdot 10^{-4}\%$); в лимонитах оно иногда повышается до тысячных долей процента, в песчаниках и сланцах лежит в пределах десятитысячных — сотысячных долей процента. Таким образом, как сами гидротермальные рудные жилы, так и окружающие их

породы по отношению к среднему кларку ртути в земной коре в десятки раз обогащены ртутью. Здесь можно говорить о первичных ореолах рассеяния ртути, подобно тем, которые были рассмотрены выше.

Почвы района имеют разную мощность в зависимости от рельефа: в балках почвенный покров превышает 1 м, самый верхний почвенный слой А имеет мощность до 35 см и содержит много гумуса. На возвышенных участках рельефа мощность почвенного покрова сокращается до 30—50 см, а мощность слоя А — до 10—15 см; этот слой состоит в основном из глины с большим количеством обломков песчаников и сланцев. Опробование производилось по геохимическим профилям вкрест простирания рудовмещающих структур с шагом опробования от 25 до 250 м. Пробы отбирались из средней части слоя А с глубины 10—20 см (в депрессиях) и 5—10 см (на возвышенностях). Из пробы отбиралась навеска в 50 г для измельчения в виброистирателе, обломки коренных пород отбрасывались. Затем отбиралось квартованием около 2 г для дальнейшего истирания в агатовой ступке и последующего спектрального анализа (по методу Е. А. Сергеева и П. А. Степанова) и химического.

Длина профилей достигала 4,5 км. Почва над участками месторождений показала резко повышенное содержание ртути — в пределах от $3 \cdot 10^{-5}$ до $9,5 \cdot 10^{-4}\%$ для восточного профиля через Есауловское месторождение и до $7 \cdot 10^{-4}\%$ для западного профиля через то же месторождение. В среднем содержание ртути в почвах над указанным месторождением составляет $2,4 \cdot 10^{-4}\%$, что примерно в 75 раз больше кларка ртути в обычных глинистых почвах и больше чем в 20 раз превышает фоновое содержание ртути для почв района.

Ширина ореолов рассеяния достигает 1700 м, в несколько раз превышая ширину самого месторождения. Такая же картина наблюдается и в профилях, пройденных вкрест простирания структуры золоторудного месторождения Острый Бутор: содержание ртути в почвах в пределах вторичного ореола рассеяния достигает $7 \cdot 10^{-4}\%$, в среднем около $1 \cdot 10^{-4}\%$, т. е. превышает натуральный фон для глинистых почв примерно в 30 раз; ширина ореола в 5—6 раз превышает ширину рудной зоны участка месторождения.

Обогащение почв ртутью произошло, очевидно, за счет разрушения руд, минералов и коренных пород, слагающих как сами месторождения, так и первичные ртутные ореолы, развитые вблизи их. Так как опробование почв значительно проще и более доступно, чем опробование коренных пород,

скрытых под этими почвами, указанные вторичные ореолы рассеяния ртути в почвах могут рассматриваться как удобные индикаторы для свинцово-цинковых, золотых и подобных им гидротермальных месторождений, обычно всегда содержащих повышенные против кларка количества ртути.

Практика металлометрической съемки

Металлометрическая съемка производится на основе геологических карт разных масштабов в зависимости от типа съемки. В настоящее время различают металлометрические съемки трех типов: маршрутную, поисковую и детальную. Вторая и третья имеет общее название площадных, маршрутная съемка отличается от них, так как ведется отдельными изолированными ходами и не охватывает всей площади.

Маршрутная съемка является рекогносцировочной и проводится обычно в районах, геологически слабо изученных. Она проводится на очень больших площадях (тысячи и десятки тысяч квадратных километров) по редкой сети маршрутов и имеет целью уточнение общих металлогенических особенностей района и выбор площадей для последующей более детальной металлометрической съемки. Обычные масштабы отчетных карт маршрутных съемок 1 : 500 000—1 : 200 000.

Поисковая металлометрическая съемка проводится в пределах площадей с уже доказанной рудной минерализацией и ставит целью обнаружение всех возможных проявлений этой минерализации и выявление закономерностей в ее распределении на изучаемой площади. Она выполняется по прямоугольной сети профилей, расстояние между которыми соответственно обосновывается. Поисковая металлометрическая съемка обычно выполняется в масштабе 1 : 100 000—1 : 50 000. Она часто сочетается с воздушной и наземной магнитометрией, электрическим зондированием, гравиметрическими съемками и с исследованием магнитной восприимчивости тех же проб рыхлых отложений.

Конечным результатом поисковой металлометрической съемки является оконтуривание перспективных участков для последующих более детальных металлометрических съемок.

Детальная металлометрическая съемка производится на перспективных площадях, выявленных поисковой съемкой или вблизи уже известных месторождений. Она чаще всего проводится в масштабе 1 : 10 000—1 : 2 000 по прямоугольной сети профилей с определенным расстоянием между ними и

имеет целью обнаружение рудных тел в коренном залегании, что осуществляется уже путем проведения соответствующих горно-геологических работ в пунктах, которые определены детальной металлометрической съемкой.

Важное значение для выявления металлометрических аномалий и ореолов рассеяния имеет определение натурального фона или местного нормального поля для тех элементов, поиски которых производятся в районе. Натуральный фон для каждого элемента определяется эмпирически, на основе результатов металлометрии на участке, удаленном от известных рудных тел и заведомых ореолов и потоков рассеяния. В первом приближении можно взять среднее арифметическое из данных всех взятых на участке и проанализированных проб, подобно тому как в свое время подсчитывали кларки элементов в горных породах и земной коре в целом.

А. П. Соловов рекомендует для указанной цели, как более обоснованный и точный, вариационно-статистический метод. По большому числу точек съемки подсчитывается количество проб, попадающих по содержанию металла в каждый из интервалов градаций, принятых при спектральном анализе. В значащих цифрах эти интервалы начиная от порога чувствительности спектрального анализа будут: а) от 1 до 2; б) от 2 до 5; в) от 5 до 10; г) от 10 до 20 и т. д.

Результаты подсчета выражаются в процентах от общего числа точек и изображаются графически. Плавная кривая, проведенная по полученным точкам, будет вариационной кривой, характеризующей частоту проб с любым из содержаний, встречаемых в местном нормальном поле. Максимальный процент частоты («мода распределения») будет характеризовать наиболее вероятное содержание металла в местном нормальном поле, а ширина вариационной кривой — степень постоянства и пределы возможных колебаний содержаний металла в точках нормального поля.

Примером построения подобных вариационных кривых является приводимая ниже диаграмма, составленная А. П. Солововым для одного из районов Каратау (рис. 13). В основу ее положены 1650 спектральных анализов проб на свинец, медь и барий. Как вытекает из этой диаграммы, для изученного района фоновое содержание свинца составляет около $2 \cdot 10^{-3}\%$, меди — $3 \cdot 10^{-3}\%$, для бария имеем два максимума — 0,07 и 0,4%, отвечающие, по-видимому, наиболее вероятным его содержаниям в двух различных геологических формациях.

Из сравнения полученных значений для фона с кларками тех же элементов следует, что в указанном районе содержание свинца и бария превышает их кларки, а содержание меди ниже кларкового. Интересно отметить, что в районе известна свинцовая и баритовая минерализации, но нет медной.

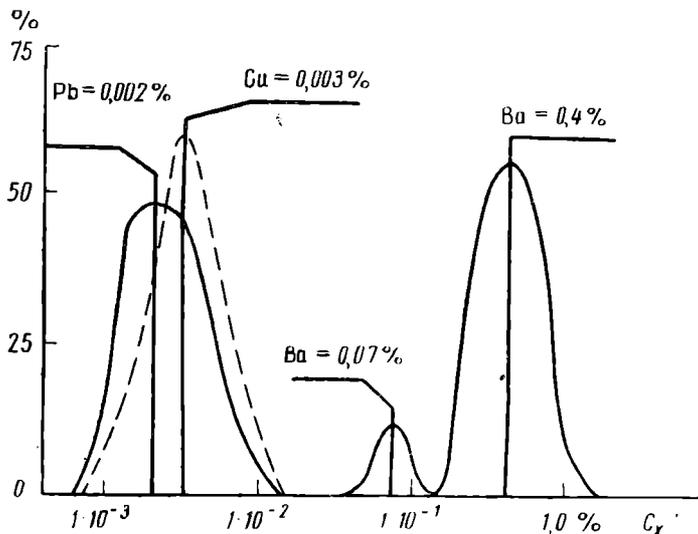


Рис. 13. Вариационные кривые содержаний металлов в нормальном поле (по А. П. Соловову)

Из рассмотрения кривых следует, что минимальные содержания, определенные для свинца и меди в районе, составляют $1 \cdot 10^{-3}\%$ (чувствительность спектрального анализа), а максимальные (в области нормального поля) — около $0,01\%$. Для бария минимальное содержание составляет около $0,05\%$, а максимальное — свыше 1% .

Фоновые значения для данного элемента в разных районах колеблются вокруг некоторой средней линии, которая должна быть близка к линии кларков; для одних районов фоновые значения выше кларков, для других — ниже. Для небольших районов, особенно если они сложены одними породами, отклонения фоновых значений от кларков могут быть значительными; примером является фоновое содержание бария в рассмотренном случае, которое значительно превышает его средний кларк ($0,05\%$).

Величина натурального фона зависит и от того, какая

фракция из рыхлых отложений передается на анализ (крупная или мелкая), так как содержания элементов в разных фракциях будут несколько различаться в зависимости от формы нахождения элементов. Чтобы элиминировать влияние этой причины следует как при определении натурального фона, так и при металлометрических съемках стараться использовать одну фракцию.

Важную роль при металлометрических съемках играет сеть опробования: при очень редкой сети возможны пропуски ореолов, при излишне густой — неоправдано возрастают затраты и удлиняется время, которое необходимо для освещения потенциальных возможностей района. Важно также и само направление сети опробования.

Изучение геологических карт района, его тектоники, петрографии и литологии обычно позволяет подметить преобладающее направление складчатых структур, разломов, контактовых зон, имеющих рудных тел и т. д. Все это позволяет выбрать направление для профилей металлометрической съемки, которые обычно располагают вкрест простирающихся рудоконтролирующих структур. Расстояние между профилями, так же как и расстояние между точками наблюдения в пределах профилей, определяется масштабом, т. е. детальностью металлометрических съемок.

При маршрутных съемках расстояние между отдельными маршрутами обычно колеблется от 2 до 5 км, иногда от 20 до 50 км, что зависит от площади картирования, перспективности района, размера ассигнований и т. д. Особое внимание при этом уделяется потокам рассеяния — долинам рек и ручьев, временным водотокам и т. д., поскольку их опробование позволяет гораздо быстрее и совершеннее составить представление о металлогении района. Ввиду того что потоки рассеяния, связанные с крупными месторождениями, обычно протягиваются на довольно значительные расстояния, измеряемые километрами, отбор проб вдоль маршрута можно производить через большие интервалы в 250—1000 м; при площадных металлометрических поисках ореолов рассеяния понадобилось бы пробы отбирать через 50—100 м. Обычно для опробования потоков рассеяния применяют такую сетку (табл. 1).

В. И. Красников считает, что возможности рационального применения метода донных отложений гораздо более широкие; в горных районах с хорошо развитой гидросетью этот метод может с успехом применяться при поисках в более крупных масштабах: 1 : 100 000 — 1 : 50 000 с отбором проб

Сетки для опробования потоков рассеяния

Масштаб поисков	Расстояние между маршрутами, км	Расстояние между точками отбора проб, км	Число проб на 1 км ²
1:1 000 000	10—5	1—0,5	0,1—0,4
1:500 000	5—3	1—0,5	0,2—0,7
1:200 000	2—1	0,5—0,25	1—4

через 200—100 м, и даже при поисках в масштабе 1 : 25 000 с отбором проб через 50—100 м. В условиях резко расчлененного рельефа поиски по потокам рассеяния можно рассматривать как ведущий метод при указанных выше масштабах работ. В ряде случаев этот метод позволяет сократить объем дорогостоящих площадных металлометрических съемок.

По данным В. В. Поликарпочкина и других исследователей, густота точек опробования по потокам рассеяния в гидросети обеспечивается 4—5 пробами на 1 км². Если же производить площадную металлометрическую съемку, то для той же цели понадобится отобрать около 40 проб на км². Кроме того, как отмечают исследователи, метод донных отложений является более глубинным, чем обычная металлотрия, поскольку сорбционные ореолы могут иногда образовываться за счет рудных элементов, принесенных подземными водами из перекрытых или нескрытых месторождений.

Пробы отбираются по мелким рекам, ручьям, распадкам, сухим логом, а также из конусов выноса и делювия. Весилисто-глинистой пробы 20—50 г. После просушки пробы просеивают через сито 0,25—0,50 мм, сокращают до 10—20 г, стирают в пудру и направляют в спектральную лабораторию.

Результаты анализов наносят затем на геолого-поисковые карты, выделяя участки с аномально высокими концентрациями рудных элементов. Эти карты позволяют потом определять районы возможного выноса искомого элемента; эти районы затем подвергаются более тщательному изучению, в том числе детальной площадной металлометрической съемке.

В активно денудированных горных районах аллювий небольших рек представляет собой своеобразную «среднюю пробу» горных пород, слагающих данный бассейн водосбора. Поэтому содержание металла в точках потока рассеяния C_x^1

прямым образом зависит от соответствующей площади бассейна денудации S_x , а не только от характеристики оруденения и процессов выветривания, как это имеет место для вторичных ореолов. Исходя из этого, А. П. Соловов предложил оценивать геохимические аномалии в аллювии показателем продуктивности потока рассеяния P_x^1 , пользуясь следующей простой формулой:

$$P_x^1 = S_x (C_x^1 - C_{\phi}^1),$$

где C_{ϕ}^1 — местное фоновое содержание металла в аллювии.

Показатель P_x^1 выражается в $m^2\%$; вдоль русла выше рудных тел он равен нулю ($C_x^1 = C_{\phi}^1$), в зоне непосредственного поступления металла в русло продуктивность потока рассеяния постепенно возрастает, ниже рудных тел она остается постоянной или медленно убывает (рис. 14).

Полная продуктивность потока рассеяния пропорциональна продуктивности ореолов рассеяния, развитых в данном

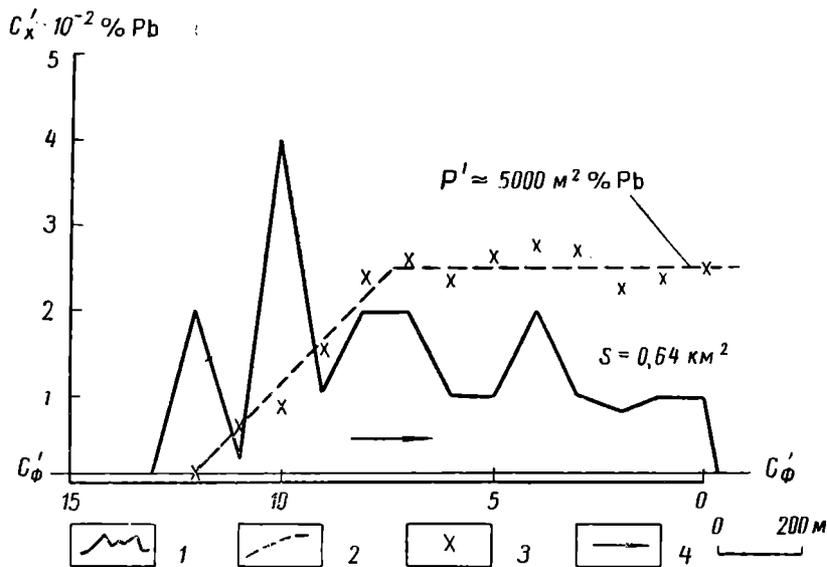


Рис. 14. Графики содержаний свинца и продуктивности потока рассеяния по левому притоку р. Бадам (по А. П. Соловову и Н. Я. Кунину, 1960):

1 — график содержаний Pb в $10^{-2}\%$; 2 — усредненный график продуктивности потока рассеяния в $m^2\%$; 3 — вычисленные значения продуктивности потока рассеяния; 4 — направление гидротока

бассейне водосбора, и потому этот показатель играет важную роль для оценки результатов геохимических поисков¹.

При металлометрической поисковой съемке отбор проб производится по сетке прямолинейных профилей, расположенных друг от друга через 500—1000 м, в пределах профилей точки отбора проб отстоят одна от другой на 50—100 м. При такой сетке ореолы рассеяния, связанные с крупными месторождениями, как показала практика, будут выявлены. Для поисков жильных линзовидных и гнездовых месторождений с относительно малыми геометрическими размерами рудных выходов профиля следует сгустить до 250 м. При детальных металлометрических съемках в зависимости от генетического типа оруденения, морфологии рудных тел и других причин применяются три системы сеток: а) 100×20 м, б) 50×10 м и в) 25×10 м.

Система 100×20 м достаточна, например, при поисках месторождений пластового типа (медистые песчаники, метасоматические залежи полиметаллических руд и т. д.); эта сетка в данных условиях достаточна уже для перехода непосредственно к разведочным работам.

Для жильных, гнездовых и подобных месторождений требуются более густые сетки: 50×10 м или даже 25×10 м. А. П. Соловов для расчета достаточности съемочной сети при поисках ореолов рассеяния вводит понятие о минимальной длине объекта поисков L и о его ширине a ($L > a$). Профили съемочной сети идут перпендикулярно длине объекта.

Очевидно, что если расстояние между профилями будет меньше L , каждый ореол обязательно будет пересекаться хотя бы одним профилем съемочной сети. Практикой установлено, что расстояния между профилями рационально брать равными $0,9 L$.

Рассуждая подобным образом в отношении шага опробования в пределах профиля, приходим к выводу, что если этот шаг будет меньше ширины ореола, тогда не менее одной точки опробования обязательно попадет внутрь контура ореола. Для того чтобы в пределах ореола можно было взять не менее двух проб, следует величину шага делать равной половине ширины объекта, т. е. равной $0,5 a$. Таким образом, прямоугольная сеть опробования должна иметь стороны — $0,9 L$ и $0,5 a$.

При изометрической форме ореолов $L = a$, и тогда сетка будет иметь стороны $0,9 a$ и $0,5 a$. На этапе детальных по-

¹ А. П. Соловов, Н. Я. Кунин. «Советская геология», 1960, № 5.

исковых работ металлометрическая съемка должна решать уже разведочные задачи, т. е. помогать оконтуривать в пределах ореола рассеяния границы рудных тел.

В этом случае сеть опробования сгущается еще больше: расстояние между профилями делается меньше размеров рудных тел, сокращается и расстояние между точками по профилю. Эти детальные металлометрические съемки заканчиваются уже горно-разведочными работами.

Отбор проб по намеченной сети производится по установленным правилам. В рыхлых отложениях пробы отбираются в зависимости от климатической зоны с разной глубины в соответствии с условиями миграции элементов. В районах аридной зоны и в горных районах пробы для поисков открытых ореолов отбираются с глубины 10—20 см; опыт показал, что такая глубина в данных условиях вполне достаточна. В районах с гумидным климатом эта глубина увеличивается до 30—40 см, иногда несколько больше, поскольку из верхних горизонтов рудные элементы в значительной мере выщелочены, кроме того, отбор проб с поверхности затруднен растительным покровом и частой заболоченностью. При поисках погребенных ореолов рассеяния пробы отбираются в соответствии с мощностью перекрывающих пустых отложений с достаточно большой глубины — десятков метров и даже больше (А. П. Соловов указывает примеры удачного ведения поисков при глубине отбора проб до 130 м).

При металлометрических поисках в коренных породах пробы отбираются, естественно, с их поверхности, так как вынос элементов из верхнего слоя коренных пород обычно очень мал и не отражается на результатах металлометрии.

Что касается веса отбираемых проб, то раньше из рыхлых отложений рекомендовалось брать 200 г, затем практика и проведенные экспериментальные исследования показали, что для металлометрических проб достаточно отбирать 50 г мелкой фракции рыхлых пород с удалением крупных обломков. Исследования показали, что мелкая фракция является достаточно представительной и указанный вес в 50 г гарантирует объективно правильные результаты. Все сказанное относится и к потокам рассеяния: из аллювия следует также отбирать мелкозем или илесто-глинистую фракцию в количестве 20—50 г.

После отбора пробы сушатся, затем просеиваются через сито с диаметром отверстий 0,5 мм. Опыт показал, что фракция в 0,5 мм является оптимальной для металлометрических поисков подавляющего числа элементов, в том числе меди,

свинца, цинка, никеля, молибдена, ванадия, олова, вольфрама, ртути и др. После просеивания вес пробы доводится до 12—15 г; этого количества вполне достаточно для всех последующих операций: истирания, спектрального анализа, радиометрического анализа и т. д.

Важнейшим методом анализа металлометрических проб считается по праву спектральный, поскольку он обладает высокой чувствительностью и массовостью при большой простоте, быстроте и дешевизне. Методы спектрального анализа, применительно к требованиям металлометрии, у нас разрабатывались рядом исследователей, особенно В. К. Прокофьевым, А. К. Русановым, А. П. Солововым, С. Д. Миллером, Е. А. Сергеевым, П. А. Степановым и др. С помощью спектрального анализа в настоящее время в металлометрических пробах определяется до 35 химических элементов (в порядке атомных номеров): Li, Be, B, F, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Sr, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Ba, Ce, Y, Hf, W, Re, Hg, Pb, Bi.

При мелкомасштабных съемках, когда ставится задача осветить в общем виде геохимические особенности района, в пробах обычно определяют около 30 химических элементов; при крупномасштабных съемках количество элементов значительно сокращается — до 5—6 и даже до 2—3 после того, как выявляются специфические геохимические особенности района. Производительность труда спектральных лабораторий, занятых анализами металлометрических проб, очень высока. Так, при круглосуточной работе трех спектрографов ИСП-22 одна лаборатория в экспедициях Казахского геофизического треста выполняет ежедневно до 2500—3200 анализов проб на 15—18 химических элементов.

Помимо перечисленных выше элементов, определяемых спектральным путем, в пробах можно также определять радиоактивные элементы U, Ra, Th соответствующими радиометрическими методами; уран обычно определяется перловым анализом.

Практика проведения металлометрических поисков подробно изложена в специальной «Инструкции по металлометрической съемке».

свинца, цинка, никеля, молибдена, ванадия, олова, вольфрама, ртути и др. После просеивания вес пробы доводится до 12—15 г; этого количества вполне достаточно для всех последующих операций: истирания, спектрального анализа, радиометрического анализа и т. д.

Важнейшим методом анализа металлометрических проб считается по праву спектральный, поскольку он обладает высокой чувствительностью и массой при большой простоте, быстроте и дешевизне. Методы спектрального анализа, применительно к требованиям металлометрии, у нас разрабатывались рядом исследователей, особенно В. К. Прокофьевым, А. К. Русановым, А. П. Солововым, С. Д. Миллером, Е. А. Сергеевым, П. А. Степановым и др. С помощью спектрального анализа в настоящее время в металлометрических пробах определяется до 35 химических элементов (в порядке атомных номеров): Li, Be, B, F, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Sr, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Ba, Ce, Y, Hf, W, Re, Hg, Pb, Bi.

При мелкомасштабных съемках, когда ставится задача осветить в общем виде геохимические особенности района, в пробах обычно определяют около 30 химических элементов; при крупномасштабных съемках количество элементов значительно сокращается — до 5—6 и даже до 2—3 после того, как выявляются специфические геохимические особенности района. Производительность труда спектральных лабораторий, занятых анализами металлометрических проб, очень высока. Так, при круглосуточной работе трех спектрографов ИСП-22 одна лаборатория в экспедициях Казахского геофизического треста выполняет ежедневно до 2500—3200 анализов проб на 15—18 химических элементов.

Помимо перечисленных выше элементов, определяемых спектральным путем, в пробах можно также определять радиоактивные элементы U, Ra, Th соответствующими радиометрическими методами; уран обычно определяется перловым анализом.

Практика проведения металлометрических поисков подробно изложена в специальной «Инструкции по металлометрической съемке».

Глава 5. ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Исключительную роль в миграции химических элементов, как известно, играют природные воды, что определяется замечательным свойством воды — универсальной способностью растворять в тех или иных количествах все элементы и все их соединения, в том числе и все природные минералы. Это убедительно доказывается чувствительными анализами всех природных вод — морей, океанов, озер, рек, подземных вод; современными методами в них обнаруживаются практически все известные в природе элементы. Это важное эмпирическое обобщение еще свыше 50 лет тому назад впервые сделал В. И. Вернадский; последующие исследования с применением чувствительнейших методов анализа полностью подтвердили это его предвидение. Таким образом, подобно горным породам, в природных водах мы имеем для каждого элемента некоторый натуральный фон, вызванный рассеянием элемента в этих водах.

Особенно велика роль природных растворов в миграции гидрогенных элементов, минералы которых образуются в природе при участии воды; для лирогенных элементов, как это выяснилось в последние годы, роль воды также весьма существенна, особенно при высоких температурах; это доказано, например, для редких земель, тория, циркония и некоторых других элементов, встречающихся иногда в значительных количествах в гидротермальных месторождениях.

Содержания отдельных химических элементов в различных природных водах весьма различны и колеблются от десятков процентов (для водорода и кислорода) до милли-

ардных и менее долей процента (для радия, радона и др.). Но и для одного и того же элемента мы наблюдаем обычно весьма значительные колебания в разных участках природных вод, причем иногда обнаруживаем аномально высокие концентрации, значительно превышающие натуральный фон. Чаще всего причиной таких аномальных концентраций элементов в водах являются повышенные их концентрации в окружающих породах, среди которых перемещаются эти воды. Особенно ярко это проявляется вблизи месторождений полезных ископаемых с их высокими кларками концентрации этих элементов.

За последние годы в результате многочисленных исследований бесспорно установлено, что в том случае, когда при своем движении природные воды дренируют месторождения или генетически связанные с ними первичные или вторичные литохимические ореолы, они обогащаются компонентами этих месторождений и ореолов, в результате чего образуются водные ореолы и потоки рассеяния элементов с аномальными, по сравнению с натуральным фоном, концентрациями. Выявление подобных водных ореолов и потоков рассеяния и их интерпретация составляют содержание гидрохимического метода поисков месторождений полезных ископаемых.

Содержание искомых элементов в водных ореолах и потоках рассеяния обычно на несколько порядков превышает их натуральный фон. Это можно видеть из цифр следующей таблицы.

Таблица 2

Содержание некоторых металлов в водах суши (в г/л)

Металл	Реки и грунтовые воды безрудных районов	Воды, дренирующие месторождения данного металла
Молибден	$n \cdot 10^{-7} - n \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-3}$
Медь	$n \cdot 10^{-6} - n \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-1}$
Уран	$n \cdot 10^{-8} - n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-2}$
Никель	$n \cdot 10^{-6} - n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-3}$
Кобальт	$n \cdot 10^{-7} - n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-3}$
Цинк	$n \cdot 10^{-7} - n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-1}$
Свинец	$n \cdot 10^{-7} - n \cdot 10^{-6}$	$n \cdot 10^{-5} - n \cdot 10^{-3}$

Приведем несколько конкретных примеров, иллюстрирующих приведенную таблицу. А. А. Бродский проводил обширные исследования по применению гидрогеохимического метода для поисков медных месторождений. Согласно его данным, содержание меди в водах рек Урала составляет $3 \cdot 10^{-5}$ г/л, в водах болот — $4 \cdot 10^{-5}$ г/л, в грунтовых водах среди зеленокаменных пород — $3-4 \cdot 10^{-5}$ г/л. В водах медных рудников Урала при рН ниже 5,3 содержание меди достигает десятых долей грамма на литр и даже целых граммов; однако при более высоком рН оно значительно снижается (до $n \cdot 10^{-5}$ — $n \cdot 10^{-4}$ г/л).

Н. И. Долуханова для молибденовых месторождений Армении указывает содержание в водах молибдена в пределах $7 \cdot 10^{-5}$ — $8 \cdot 10^{-3}$ г/л. А. И. Германов и А. А. Сауков отмечают для урановых месторождений случаи, когда содержание металла в водных ореолах поднимается до сотых долей грамма на литр при натуральном фоне в миллионные доли грамма на литр.

По данным С. Р. Крайнова, содержание сульфат-иона в ореолах некоторых колчеданных месторождений Армении достигает 0,2 г/л, при фоновом содержании того же иона в водах района, не превышающем немногих тысячных грамма на литр. Подобных примеров в настоящее время известно весьма много для различных химических элементов, и все они с полной определенностью указывают на то, что химический состав природных вод при их соприкосновении с рудными телами существенно меняется, причем наиболее характерно значительное увеличение в водах концентрации рудообразующих элементов.

Концентрация химических элементов в природных водах зависит от ряда причин, в том числе от содержания этих элементов в окружающих породах и рудах. Большое значение имеет также растворимость химических соединений данного элемента в природных водах, она, как известно, весьма различна для разных элементов и для разных соединений одного и того же элемента. Достаточно, например, сравнить высокую растворимость в водах хлоридов, сульфатов и карбонатов щелочных и некоторых щелочноземельных элементов с ничтожно малой растворимостью природных соединений тантала, циркония, тория и других пирогенных элементов. Поэтому в природных водах обычно наблюдаются высокие концентрации натрия, калия, магния, кальция наряду с анионами хлора, угольной и серной кислот; что касается труднорастворимых пирогенных элементов, то даже

вблизи месторождений содержания их в водных ореолах являются невысокими по абсолютной величине, хотя и повышенными, иногда значительно, по отношению к натуральному фону.

Растворимость химических соединений является весьма сложной функцией от ряда причин, связанных как со свойствами самих элементов (их валентностью, радиусом ионов, способностью к поляризации), так и с составом вод (их кислотнo-щелочными и окислительно-восстановительными свойствами, наличием в растворе таких активных газов, как кислород, углекислота, сероводород и другие, наличием тех или иных ионов, с которыми данный ион может давать соединения разной степени растворимости и т. д.). Все это хорошо известно и не нуждается в доказательствах. Очень большое значение имеет также форма нахождения элементов в породах и минералах; например, натрий, калий и кальций легко переходят в раствор, если они присутствуют в породах в форме хорошо растворимых хлоридов или сульфатов, и трудно выщелачиваются, если входят в состав полевых шпатов. Легче всего переходят в природные воды элементы из растворов, пропитывающих горные породы и руды, а также элементы, сорбированные минеральными и органическими сорбентами в результате ионного обмена с элементами этих вод. Элементы, слагающие кристаллические решетки минералов, за некоторыми исключениями (когда минералы легко растворимы) в природные воды переходят значительно труднее — здесь необходимо растворение всего минерала или выщелачивание из него отдельных компонентов. То же самое относится к элементам, присутствующим в минералах в форме изоморфной примеси — здесь также необходимо разрушение решетки, причем, как показал А. Е. Ферсман, это обычно труднее осуществляется для минералов с высокими энергиями кристаллических решеток, по сравнению с минералами, у которых величины энергии решеток малы.

Большое значение для степени растворимости отдельных элементов имеет состав растворов, особенно величина рН: многие минералы легко растворяются в кислых растворах и трудно в щелочных (например, окислы и гидроокислы многих металлов); другие, наоборот, легко растворяются в щелочных и труднее в кислых растворах (например, кварц, некоторые сульфиды); многие минералы урана относительно легко растворяются как в кислых, так и в щелочных растворах; некоторые минералы легко растворяются и в нейтральных водах (ряд хлоридов, сульфатов и др.).

Многие химические элементы в природных условиях легко меняют свою валентность, что оказывает существенное влияние на растворимость их соединений и на миграцию элементов. Так, например, растворимость природных соединений двухвалентного железа в нейтральных или слабощелочных водах во много раз больше, чем растворимость гидрата окисного железа; этим объясняются многие важные моменты в геохимической истории этого элемента (например, дефицит железа в морях, океанах и поверхностных водах, повышенные его содержания в некоторых подземных водах при отсутствии в них свободного кислорода и т. д.). Соединения шестивалентного урана гораздо лучше растворимы, чем соединения четырехвалентного, поэтому смена окислительного режима подземных вод, несущих уран, на восстановительный приводит к переходу урана в четырехвалентное состояние и соответственно к выпадению большей его части в твердую фазу.

Этой причиной объясняются широкие водные ореолы в окислительных условиях как для урана, так и для таких элементов, как медь, сера и другие, и узкие ореолы в тех же условиях для железа, марганца и некоторых других родственных элементов. В восстановительных условиях мы наблюдаем обратную картину. Особенно важен с точки зрения поисков сульфидных месторождений переход двухвалентного аниона серы в шестивалентный катион с образованием комплексного сульфат-аниона $(SO_4)^{2-}$, осуществляемый при окислении месторождений; при этом труднорастворимые сульфиды металлов (меди, цинка, свинца, железа и др.) переходят в хорошо растворимые сульфаты, в результате чего около подобных месторождений образуются богатые сульфатами воды, дающие протяженные ореолы и потоки рассеяния с аномально высокими концентрациями как сульфат-иона, так и указанных рудных элементов.

Когда говорят о миграции химических элементов в природных растворах, обычно для характеристики этой миграции приводят данные о растворимости соединений этих элементов, возможных в данных условиях, причем считают, что если данный катион может с анионами раствора дать легко растворимые соединения, то его миграционная способность является высокой и наоборот. Например, о миграционной способности бария судят по высокой растворимости его хлорида, поскольку в природных растворах ионы хлора практически всегда присутствуют, а барий с хлором способен дать легкорастворимый $BaCl_2$. Но при этом иногда не доучиты-

вают, что в растворах одновременно почти всегда присутствует и ион $(\text{SO}_4)^{2-}$, с которым барий дает труднорастворимый сульфат BaSO_4 . Поэтому поведение бария, его способность к миграции будут определяться не его легкорастворимым хлоридом, а труднорастворимым сульфатом. Поэтому, например, нефтяные воды, имеющие восстановительный характер и поэтому лишенные сульфат-ионов, могут быть обогащены растворенным барием (одновременно также его аналогом — радием) в отличие от обычных сульфатных вод. Точно также, например, поведение в растворах фосфора определяется не столько возможным наличием в природных водах хорошо растворимого фосфата натрия, как присутствием кальция, который дает труднорастворимый фосфат и по существу определяет концентрацию фосфора в растворе.

Поиски сульфидных месторождений гидрогеохимическим методом

Особенно перспективным гидрогеохимический метод оказывается при поисках сульфидных месторождений; это объясняется тем, что при действии на сульфиды воды и растворенных в ней кислорода и углекислоты образуются легкорастворимые сульфатные и карбонатные соединения халькофильных элементов, которые в ряде случаев могут довольно далеко мигрировать, образуя протяженные водные ореолы рассеяния. Эти процессы происходят в зоне гипергенеза, в условиях окислительной обстановки, принципиально отличной от условий, в которых происходило образование сульфидных месторождений (в восстановительной среде при наличии свободного H_2S).

Реакции окисления сульфидов в сульфаты являются экзотермическими и идут самопроизвольно; при этих реакциях выделяется тепло, причем часто в таких количествах, что это заметно отражается на величине геотермического градиента. В ряде случаев это явление носит характер «подземных колчеданных пожаров»; это имеет место, когда колчеданные руды при их разработке вступают в непосредственный контакт с большим количеством свободного кислорода; при этом температура рудничных вод в зоне пожаров поднимается иногда до 80 и даже 100° и эти процессы носят явно выраженный гидротермальный характер, не будучи, конечно, связаны ни с какими магматическими очагами.

Экзотермический характер реакций окисления сульфидов в сульфаты подчеркивается их теплотами: переход 1 г *моля*

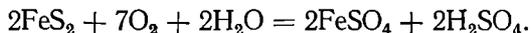
ZnS в ZnSO_4 сопровождается выделением 186 ккал тепла; для реакции $\text{CdS} \rightarrow \text{CdSO}_4$ эта величина составляет 185 ккал; для $\text{CuS} \rightarrow \text{CuSO}_4$ — 171 ккал; для $\text{PbS} \rightarrow \text{PbSO}_4$ — 195 ккал; для $\text{Ag}_2\text{S} \rightarrow \text{Ag}_2\text{SO}_4$ — 164 ккал.

Окисление сульфидов происходит за счет кислорода, который в основном приносится в растворенном состоянии с нисходящими подземными водами; при этом важно отметить, что состав метеорных вод, проникающих потом в глубины, существенно отличается по своему газовому составу от состава атмосферного воздуха. Так, в газе, выделенном из дождевой воды, содержится около 30% кислорода и 10% углекислого газа (в воздухе они составляют соответственно 23 и 0,03%). Проходя через почвенный слой, обогащенный остатками органических веществ, воды теряют часть своего кислорода, но еще более обогащаются углекислотой. Роль углекислоты при гипергенезе горных пород, как известно, весьма велика; она способствует химическому выветриванию силикатов, карбонатов и других минералов, извлекая из них и переводя в легкорастворимую форму калий, натрий, кальций, магний, закисное железо, уран и многие другие элементы. Карбонаты, бикарбонаты или еще более сложные комплексы этих элементов являются легкорастворимыми в природных водах, хорошо мигрируют вместе с ними и создают иногда обширные водные ореолы, которые могут быть использованы при гидрогеохимических поисках. Но в случае окисления сульфидных месторождений роль углекислоты проявляется значительно позднее, чем роль кислорода. Обычно вначале образуются сульфаты, которые лишь позднее при воздействии карбонатных растворов постепенно переходят в карбонаты.

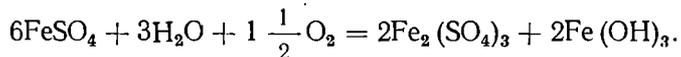
Когда говорят об окислении сульфидов, имеют в виду в качестве окислителя обычно лишь кислород или некоторые его соединения, способные отдавать кислород (например, сульфат окисного железа). Но при этом, возможно, существенную роль играет также озон — O_3 , постоянно присутствующий в атмосфере, хотя и в ничтожно малых количествах; эта активная форма кислорода образуется при грозовых разрядах, при воздействии на кислород ультрафиолетовых лучей в высоких частях атмосферы и, возможно, при некоторых других реакциях. Постоянно образуясь, озон очень быстро и расходуется, являясь гораздо более энергичным окислителем, чем обычный кислород; поэтому количества его в тропосфере очень малы, составляя, по данным Е. С. Бурксера, над Черным морем около Одессы летом $0,024 \text{ мг/м}^3$, а зимой

0,014 мг/м³. Озон является более энергичным окислителем, чем обычный кислород: некоторые реакции окисления, которые не идут совсем или идут крайне медленно в присутствии кислорода, при наличии озона протекают очень быстро. Так, например, на киноварь кислород при обычных условиях практически не действует, но в присутствии озона, как показали наши эксперименты, киноварь легко окисляется и, подобно другим сульфидам, переходит в сульфат.

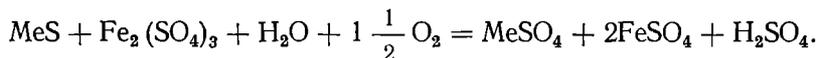
Большую роль при окислении сульфидов в сульфаты играет также сульфат окисного железа Fe₂(SO₄)₃, образующийся при окислении сульфидов железа. Как известно, реакция окисления пирита может быть изображена следующей формулой:



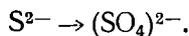
Образовавшийся сульфат закисного железа при наличии свободного кислорода легко окисляется в сульфат окисного железа:



Сульфат окиси железа является сильным окислителем для ряда сульфидов, теряя при этом кислород и восстанавливаясь до сульфата закисного железа по схеме:



С помощью сульфата окисного железа, как показали наши экспериментальные исследования, довольно легко может быть окислена и переведена в сульфат даже киноварь, которая, как упоминалось выше, кислородом воздуха не окисляется; другие сульфиды окисляются в присутствии сульфата окисного железа значительно энергичнее, в соответствии с положением металлов в ряду окислительно-восстановительных потенциалов. При окислении сульфидов в сульфаты присоединяется кислород и сера из двухвалентного аниона переходит в шестивалентный катион, окруженный четырьмя анионами кислорода:



Радиус комплексного сульфат-иона (2,95 Å) значительно больше, чем радиус аниона серы (1,74 Å); этой причиной, согласно геоэнергетической теории А. Е. Ферсмана, объяс-

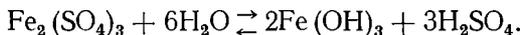
няется значительно более высокая растворимость сульфатов по сравнению с сульфидами. Действительно, растворимость первых по сравнению со вторыми обычно возрастает в тысячи и десятки тысяч раз. Это можно видеть из следующих опубликованных цифр (табл. 3).

Таблица 3

Растворимость сульфидов и сульфатов в воде

Свежеосажденный сульфид	Растворимость сульфида, г/л	Сульфат	Растворимость сульфата, г/л
ZnS	$6,870 \cdot 10^{-4}$	ZnSO ₄	531,2
FeS	$61,55 \cdot 10^{-4}$	FeSO ₄	157
CuS	$3,45 \cdot 10^{-4}$	CuSO ₄	172
Ag ₂ S	$1,36 \cdot 10^{-4}$	Ag ₂ SO ₄	7,7
PbS	$8,62 \cdot 10^{-4}$	PbSO ₄	0,041

Из сравнения этих цифр становится ясной исключительно большая геохимическая роль процессов окисления сульфидов, так как при этом халькофильные элементы и сера переходят в легкорастворимые сульфаты, в форме которых затем могут достаточно далеко мигрировать, создавая более или менее протяженные вторичные водные ореолы рассеяния около сульфидных месторождений, с которыми они генетически связаны. При окислении пирита, марказита и халькопирита образуется сульфат окисного железа. Это соединение в обычных природных условиях является неустойчивым и в присутствии воды гидролизует, образуя гидрат окиси и свободную серную кислоту по реакции:



Гидрат окиси железа растворим лишь в относительно кислых растворах (pH < 3), поэтому в случае хотя бы частичной нейтрализации серной кислоты он выпадает в твердую фазу в пределах зоны окисления, придавая ей типичные бурые и коричневые тона, характерные для железной шляпы. Вследствие образования свободной серной кислоты при окислении сульфидов железа, почти всегда присутствующих в тех или иных количествах в сульфидных месторождениях, природные воды, дренирующие указанные месторождения, характеризуются также кислой реакцией. Так, по данным А. А. Бродского,

величина рН кислых вод на колчеданных месторождениях Урала колеблется в пределах 2,8—5. В этих же водах содержание сульфат-иона составляет от 1 до 30 г/л, железа — от следов до 250 мг/л, алюминия — от 10 до 2500 мг/л. Еще более кислыми могут быть рудничные воды, в результате интенсивного поступления к сульфидам свободного кислорода атмосферы. Так, Н. И. Хитаров и Е. П. Муликовская¹ описали рудничные воды с рН в пределах от 2,75 до 1,07. Вследствие высокой растворимости сульфатов в кислых водах, содержание в последних иона $(\text{SO}_4)^{2-}$, халькофильных и некоторых других элементов обычно достигает значительных величин. Так, в упомянутых выше рудничных водах содержание сульфат-иона в двух случаях достигало 96 и 202 г/л; содержание меди было в пределах 0,07—6,35 г/л; цинка — 0,05—3,17 г/л, марганца — 0,005—0,25 г/л; алюминия — 0,012—3,44 г/л; трехвалентного железа — 0,01—14,24 г/л и т. д.

Интересные многочисленные данные по химическому составу рудничных вод приведены в опубликованной литературе, в том числе в известных сводках В. Эммонса «Вторичное обогащение рудных месторождений» и С. С. Смирнова «Зона окисления сульфидных месторождений». Рассматривая опубликованные анализы рудничных вод медных, серебряных, медно-цинковых и свинцово-цинковых месторождений, можно видеть, что они всегда обогащены ионами (SO_4) , Cu, Fe, Zn и имеют, как правило, кислую реакцию. Помимо указанных компонентов, определяющих специфику вод зоны окисления колчеданно-полиметаллических месторождений, в них постоянно находятся также в значительных количествах Ca, Al, Na, Mg, в меньших — Mn, K, As, Ni, Pb, Ag и другие элементы, присутствующие в первичных рудах месторождений хотя бы и в очень небольших количествах. В последние годы были разработаны особо чувствительные методы анализа, которые позволили во всех водах подобных месторождений обнаружить также U, Mo, Hg и многие другие элементы.

За годы, прошедшие со времени опубликования упомянутых сводок Эммонса и Смирнова, методы анализа были настолько усовершенствованы и чувствительность их стала так велика, что современный аналитик, используя методы химии, спектроскопии, полярографии, люминесценции, радиохимии, активационного анализа и другие, в состоянии в любом природном объекте — горной породе, минерале, воде,

¹ Н. И. Хитаров, Е. П. Муликовская. К геохимии рудничных вод сульфидных месторождений. «Проблемы сов. геологии», 1935, № 8.

организме — обнаружить и количественно определить практически все известные элементы периодической таблицы Менделеева, за исключением разве искусственно полученных короткоживущих, в том числе трансурановых элементов. Эти успехи в области анализа чрезвычайно расширили наши представления о распространении химических элементов в земных объектах и подтвердили гениальные догадки естествоиспытателей прошлого о рассеянии элементов, наиболее ярко выраженные В. И. Вернадским в его идеях о «всюдности» атомов. Поэтому списки элементов, обнаруженных в природных водах 25 лет тому назад (время издания книги С. С. Смирнова «Зона окисления сульфидных месторождений»), в настоящее время должны быть существенно пополнены. Кислые воды зоны окисления сульфидных месторождений, мигрируя среди разных пород и минералов, постепенно нейтрализуются; при этом ряд содержащихся в них химических элементов выпадает в форме труднорастворимых соединений, образующихся при гидролизе их сульфатов, например, в форме $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и т. д. В результате за счет указанных элементов минерализация этих вод значительно уменьшается. Если эти процессы проходят в карбонатных породах, в результате эволюции кислых растворов за счет слабой уголекислоты пород и сильных оснований растворов, могут образоваться не только нейтральные, но даже слабощелочные растворы. Эти слабощелочные растворы, как правило, имеют еще более низкую минерализацию, так как из них будут удаляться не только гидраты ряда элементов, но также и карбонаты, в том числе CaCO_3 , PbCO_3 , ZnCO_3 и т. д.

В общем, сравнивая состав вод зоны окисления сульфидных месторождений, можно заметить, что в ходе эволюции растворов от кислых через нейтральные к слабощелочным постепенно уменьшается содержание в них всех металлов за исключением натрия и калия, особенно резко падает концентрация цинка, меди, железа и алюминия. Характер поведения разных химических элементов в указанных растворах хорошо виден на старой диаграмме Э. Ходжа (рис. 15).

Количество окисляющихся сульфидов в данном объеме зоны окисления с течением времени постепенно уменьшается и в пределе достигает нуля; в этих условиях нисходящие метеорные воды, проходя через продукты зоны окисления, представленные сульфатами, карбонатами, окислами и другими минералами, характерными для соответствующих стадий процессов окисления, очевидно, уже не будут кислыми и

не будут поэтому такими агрессивными, какими они были на первых этапах формирования зоны окисления, когда шло преобразование сульфидов в сульфаты. Поэтому кислая реакция для подобных вод уже не будет являться характерной; однако эти воды, пройдя через продукты зоны окисления, в которых неизбежно сохранились в тех или иных количествах элементы, характерные для месторождения, все же будут относительно обогащены ими, будут в этом смысле аномальными и, следовательно, явятся индикаторами-указателями месторождений.

В природе могут быть и такие случаи, когда метеорные воды, перемещаясь среди вмещающих пород, могут встречать сульфидные руды на разных глубинах и, следовательно, на разных стадиях их окисления; очевидно, что при этом будут получаться и несколько разные растворы, но общим во всех случаях останется относительно высокое содержание в водах элементов, характерных для месторождений, т. е. Cu, Pb, Zn и т. д.; сульфат-ион будет типичным для всех случаев, когда сульфиды еще сохранились и окисляются или когда имеются сульфатные минералы; кислая реакция будет характерна лишь для зон, в которых еще сохранились сульфиды и т. д.

Глубина зоны окисления сульфидных месторождений определяется глубиной, до которой может проникать свободный кислород. Эта глубина различна для разных месторождений и зависит от многих причин, в том числе от климата, морфологии местности, минералогического состава, структур и текстур руд, состава вмещающих пород и их трещиноватости и пористости, уровня грунтовых вод и т. д. Например, в тропических странах зоны окисления развиваются значительно глубже, чем в полярных; это зависит от того, что скорости химических реакций, в том числе и реакций окисления сульфидов в сульфаты, сильно зависят от температуры, ускоряясь в среднем в 2 раза при повышении температуры на 10°. Большую роль играет и то обстоятельство, что эти

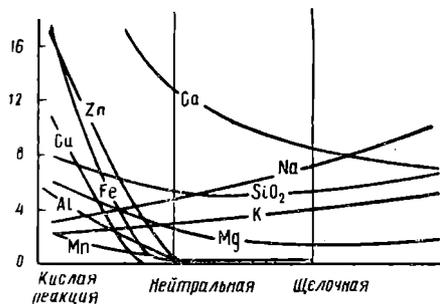


Рис. 15. Диаграмма, показывающая концентрации отдельных элементов и SiO_2 в кислых, нейтральных и щелочных рудничных водах (по Э. Ходжу)

процессы происходят в присутствии воды, поэтому в жарких странах, где температуры не опускаются ниже 0° , эти процессы идут непрерывно, пока имеются в наличии необходимые реагенты: сульфиды, кислород, вода. В холодных странах в те периоды, когда температуры опускаются ниже 0° , воды замерзают и указанные реакции окисления практически останавливаются, так как кислород воздуха не может свободно проникать до соприкосновения с сульфидами. Поэтому зимой в холодных странах эти реакции окисления, так же как и другие природные реакции, вблизи поверхности сильно замедляются и практически протекают лишь в периоды, когда вода является жидкостью. Конечно, на некоторых глубинах, где преобладают температуры выше 0° , реакции окисления пойдут при условии, что там будет необходимый для этого кислород, что не всегда имеет место, если кислород не поступает на эти глубины свободно из атмосферы.

Ю. Ю. Бугельский, сравнивая развитие зон окисления сульфидных месторождений в разных климатических условиях, наглядно показал, что действительно существуют значительные различия в этих зонах, связанные с количеством тепла, участвующего в гипергенных реакциях. Это тепло (C) является разностью между теплом, поступающим от Солнца (A), и теплом, которое тратится на испарение выпадающих метеорных осадков (B). Таким образом, зная указанные величины (A и B) для каждой данной местности, можно рассчитать то количество тепла (C), которое участвует в поверхностных гипергенных процессах, включая энергию, поглощенную зелеными растениями в процессе фотосинтеза, и ту энергию, которая затрачивается на различные эндотермические реакции. Следует отметить, что реакции окисления сульфидов в сульфаты являются, как отмечалось выше, экзотермическими, т. е. идут с выделением тепла и, следовательно, могут проходить самопроизвольно, без поступления тепла. Но последующие реакции, которые протекают в зонах окисления сульфидных месторождений, в том числе реакции превращения сульфатов в карбонаты, образования сложных фосфатов, арсенатов, ванадатов и т. д., являются, как показывают термодинамические расчеты, проведенные Бугельским, эндотермическими и могут, следовательно, протекать лишь при поступлении энергии извне; такой энергией для поверхностных гипергенных процессов является энергия солнечных лучей, вернее та ее часть, которая остается за вычетом энергии, затраченной на испарение воды.

Исходя из этих общих теоретических соображений, можно ожидать, что в то время, как первые стадии формирования зоны окисления, связанные с экзотермическими реакциями перехода сульфидов в сульфаты, будут протекать в любых климатических условиях, последующие стадии, связанные с эндотермическими реакциями образования фосфатов, арсенатов, ванадатов, частично карбонатов и других минералов, будут развиваться предпочтительно в теплых условиях, когда количество поступающего тепла довольно значительно. Наблюдения в природе, как показал автор на ряде примеров, в общем виде подтверждают эту закономерность.

Этот вывод не является неожиданным, особенно если мы обратимся к аналогичным примерам из других естественных наук — почвоведения, ботаники, зоологии и других; хорошо известна климатическая зональность почв, ярко проявлено различие в животном и растительном мире в зависимости от количества тепла и влаги, которое получает та или иная местность и т. д. В минералогии эти особенности не бросаются так ярко в глаза, но они также существуют. Наличие указанных выше сложных по своей конституции фосфатов, арсенатов, ванадатов и других минералов, как правило, лишь в условиях теплого и сухого климата обычно объясняли сухостью климата, малым количеством метеорных осадков. Бугельский показал, что в ряде случаев такое объяснение недостаточно — подобные минералы отсутствуют и в тех областях (например, Якутии), климат которых является достаточно сухим, но в то же время и суровым.

На скорость окисления сульфидных месторождений большое влияние оказывают также минеральный состав, структурные и текстурные особенности руд и характер вмещающих пород. Ясно, что процессы окисления легче пойдут в том случае, когда сульфиды ассоциируют с карбонатами, а не с кварцем, поскольку карбонаты легче растворимы и, следовательно, более проницаемы для нисходящих растворов. Массивные сплошные руды, как правило, будут труднее подвергаться воздействию растворов, чем руды трещиноватые, ленточные и т. п., так как в последних циркуляция вод значительно облегчена. Пути циркуляции растворов определяются тектоническим строением и литологическим составом пород. Легче всего растворы продвигаются через пористые породы, поэтому, например, среди песчаников окисление сульфидов происходит быстро и равномерно на всю возможную глубину. Наоборот, в труднопроницаемых породах — сланцах,

роговиках, эффузивах — растворы могут перемещаться лишь по отдельным трещинам, поэтому и окисление сульфидов идет лишь около этих трещин и почти не затрагивает другие участки.

Если сульфидное месторождение залегает в известняках, образующаяся при окислении сульфидов серная кислота и продукт ее воздействия на карбонаты — углекислый газ активно реагируют с известняками, усиливая в них карстовый процесс и способствуя быстрому продвижению зоны окисления, нижняя граница которой в таких случаях иногда достигает сотен метров от поверхности.

Химические элементы, переходящие в раствор в зоне окисления сульфидных месторождений, в дальнейшем частично выпадают из этих растворов в результате разнообразных реакций, частично остаются в растворенном состоянии, входя в водные ореолы рассеяния. Осаждение элементов из растворов, как известно, может осуществляться в результате разных причин, ведущих к понижению их растворимости в результате образования труднорастворимых соединений. Образование их может осуществляться разными путями, среди них важнейшими являются следующие.

1. Воздействие на растворы минералов вмещающих пород; таким путем образуются карбонаты меди, цинка и других металлов из сульфатных растворов, циркулирующих среди известняков, доломитов и других карбонатных пород.

2. Взаимодействие растворов с растворами, в результате чего образуются труднорастворимые фосфаты, арсенаты и другие соединения халькофильных металлов.

3. Взаимодействие растворов с газами, например, образование вторичных сульфидов при действии сероводорода на раствор металлов.

4. Осаждение путем гидролиза; так образуются, например, железные шляпы над сульфидными месторождениями в результате гидролиза сульфатов железа и образования гидратов.

5. Осаждение элементов путем сорбции из растворов высокодисперсными глинами, гидратами железа и марганца и т. д.

В поверхностных условиях в аридном климате существенную роль иногда может играть также испарение растворов, из них могут при этом выпадать мелантерит, халькантит и другие сульфаты.

В результате указанных причин значительная часть халькофильных элементов, поступивших в растворы при

окислении сульфидных месторождений, будет из них удалена, причем очевидно, что эта часть будет тем значительнее, чем больше путь, который при своей миграции пройдут эти растворы в стороны от месторождения. В обратной зависимости от этого будет находиться концентрация указанных элементов в водных растворах ореола — она в идеальном случае будет максимальной для рудничных вод, т. е. в пределах самих рудных тел, подвергающихся процессам окисления, и будет убывать в зависимости от степени удаления этих растворов от рудных тел.

Следовательно, если максимальное содержание данного элемента в рудничных водах мы обозначим через C_p , то на некотором расстоянии от рудного тела (l) оно будет составлять C_l , которое будет меньше C_p , поскольку, как мы видели, большая или меньшая часть металла будет удалена из растворов в результате тех или иных перечисленных выше процессов осаждения. Эта разность $C_p - C_l$ будет в общем виде функцией расстояния l (симбатна l), но, кроме того, она зависит также от степени разбавления растворов водами, практически не содержащими данного элемента или содержащими его меньше, чем рассматриваемые воды. Степень разбавления ($K_{разб}$) в общем виде также является функцией расстояния.

Таким образом

$$C_l = \frac{C_p - C_{осажд}}{K_{разб}}$$

Другими словами, концентрация данного металла в природных водах на расстоянии l от рудного тела будет равна разности между C_p и $C_{осажд}$, деленной на коэффициент разбавления.

Коэффициент разбавления для разных условий может варьировать в весьма широких пределах — от 1 (когда разбавления практически нет) до бесконечности, когда количество посторонних разбавляющих вод, по сравнению с металлоносными, является неограниченно большим. В очень широких пределах может в природных условиях меняться также и количество элемента, потерянного раствором в результате перехода его в твердую фазу, что зависит от большого числа факторов, в том числе от тех, которые определяют сорбцию элемента и выпадение его в форме труднорастворимых соединений. В связи с этим выразить все эти возможные вариации количественно, в виде строгой математической формулы, по-видимому, вообще невозможно; поэтому приходится огра-

ничиваться лишь формулами-схемами, назначение которых— иллюстрировать ход рассуждений.

В зависимости от степени влияния вещества рудных тел на химический состав подземных вод среди последних в районах сульфидных месторождений можно, согласно А. А. Бродскому, выделять три типа: а) рудные воды, б) ореольные воды, в) фоновые воды¹.

Рудные воды находятся в рудных телах и их состав формируется под их воздействием. Площадь распространения рудных вод зависит от гидрогеологических условий, состава вмещающих пород и интенсивности изменений их химического состава. Для зоны окисления сульфидных тел автор выделяет 2 подтипа рудных вод: 1) воды зоны окисляющихся гипогенных минералов и 2) воды зоны вторичных минералов. Специфические особенности формирования рудных вод в пределах сульфидных месторождений были рассмотрены выше.

К ореольным водам А. А. Бродский относит воды, окружающие рудные тела и имеющие измененный химический состав. Они формируются или под влиянием растекающихся рудных вод, или при взаимодействии подземных вод с гидротермально измененными породами вокруг рудных тел, с первичными и вторичными ореолами рассеяния рудных месторождений. Нетрудно видеть, что в конечном счете все ореольные воды генетически связаны с рудными телами, формируясь под влиянием рудных вод или под влиянием ореолов, окружающих рудные тела. Поэтому ореольные воды отличаются признаками, характерными для рудных тел, что и делает их ценными индикаторами при поисках рудных месторождений. Если ореольные воды образовались за счет рудных вод или под воздействием первичных ореолов (включая сюда гидротермально измененные породы), они будут непосредственно примыкать к рудным телам; если же ореольные воды образовались за счет воздействия вторичных ореолов, они, как правило, к рудным телам примыкать не будут. Все это следует учитывать при гидрогеохимических поисках.

Если рудные тела залегают в зоне грунтовых вод или в зоне аэрации, химический состав и рудных, и ореольных вод формируется, очевидно, под влиянием как непосредственно рудных тел, так и первичных и вторичных ореолов их рассеяния. В случае, когда рудные тела залегают значительно

¹ А. А. Бродский. Некоторые теоретические положения гидрохимического метода поисков сульфидных месторождений. Междунар. геол. конгресс, 21 сессия. Госгеолтехиздат, М., 1960.

ниже зоны грунтовых вод, изменение химического состава последних будет зависеть лишь от влияния ореолов, если последние расположены в зоне грунтовых вод. Что касается влияния самих рудных тел, то оно будет сказываться лишь в случае подпитывания грунтовых вод глубокими восходящими рудными водами.

Ореольные воды могут распространяться на различные расстояния. Если они образовались при растекании рудных вод, эти расстояния обычно измеряются сотнями метров; если они формировались под влиянием первичных, а тем более вторичных ореолов, эти расстояния могут быть значительно больше, особенно для хорошо мигрирующих в природных водах элементов. Так, например, для цинка водные ореолы иногда удается проследить на 3—5 км и даже больше от рудных месторождений; для свинца водные ореолы значительно уже, поскольку этот элемент мигрирует гораздо слабее, легко давая труднорастворимые минералы. Следует в связи с этим еще раз подчеркнуть особое значение карбонатов среди окружающих пород: в некарбонатной обстановке практически почти все продукты окисления сульфидов переходят в воды и вместе с ними в форме сульфатов при низком рН довольно далеко мигрируют; в карбонатной обстановке картина резко меняется — вследствие нейтрализации кислых вод большинство катионов переходит в твердые фазы, образуя карбонаты, гидроокислы и другие минералы, в растворе сохраняется лишь сульфат-ион $(SO_4)^{2-}$, который и является индикатором на сульфидные руды. Совершенно очевидно, что на масштабы распространения ореольных вод большое влияние помимо химической активности среды оказывают также гидродинамические условия передвижения подземных вод; ясно, например, что эта величина будет больше в тектонически нарушенных зонах, чем в сплошных монолитных породах.

Содержания отдельных металлов в ореольных водах, как правило, значительно меньше, чем в водах рудных; в последних они составляют обычно десятки, сотни и даже тысячи миллиграммов на литр, в то время как в ореольных водах они обычно не превышают одного миллиграмма, часто опускаясь до десятых, сотых и даже тысячных долей миллиграмма на литр, приближаясь в пределе к содержанию металлов в фоновых водах.

Под фоновыми водами обычно понимают природные воды данной территории, химический состав которых не испытал непосредственного влияния рудных тел или связан-

ных с ними ореолов. В этих водах присутствуют те же рудные элементы, что и в рудных и ореольных водах, но в более низких концентрациях. Согласно имеющимся в литературе данным, содержания некоторых рудных элементов в природных водах, которые можно рассматривать как фоновые, приведены в табл. 2.

Но содержание некоторых элементов в фоновых водах иногда может быть достаточно высоким и даже превышать содержание их в некоторых рудных и ореольных водах. Таковы, например, широко распространенные элементы: натрий, калий, магний, кальций, хлор и т. д. В некоторых фоновых водах высоких концентраций достигает сульфат-ион, однако имеется важное различие между фоновыми и ореольными и рудными водами. В первых повышенные концентрации сульфат-иона обычно сопровождаются одновременным увеличением концентрации хлор-иона и гидрокарбонат-иона, чего не наблюдается в водах, формирующихся под воздействием окисляющихся сульфидных тел; здесь высокие концентрации сульфат-иона не сопровождаются одновременным ростом концентрации указанных анионов (рис. 16). Это различие является весьма характерным; отношение сульфат-иона к хлор-иону позволяет поэтому довольно легко отличить фоновые воды от ореольных и рудных вод — у первых это отношение будет значительно меньше, чем у вторых. Если фоновые воды формируются в восстановительных условиях, они могут содержать высокие концентрации железа, марганца и других элементов в форме бикарбонатов двухвалентных катионов, хорошо растворимых в этих условиях.

Величина рН для рудных вод обычно низка, и эти воды показывают явно кислую реакцию; это не относится, конечно, к водам среди карбонатных пород, где весьма быстро наступает нейтрализация. Ореольные воды обычно имеют уже более высокие значения рН вследствие воздействия окружающих пород, и в этом отношении они не отличаются от фоновых вод, формирующихся без влияния сульфидных руд. При одном и том же рН рудные и ореольные воды имеют обычно более высокую минерализацию, чем фоновые, что объясняется происхождением тех и других; однако из этого правила имеется много исключений, зависящих в основном от влияния окружающих пород. Скорость окисления данного сульфида сильно зависит от наличия других сульфидов, так как в этом случае между различными парами минералов, погруженными в раствор, возникают гальванические токи, причем катодом является сульфид с более высоким

Электродным потенциалом, а анодом — сульфид с более низким. Готтшалк и Бючлер определили потенциалы ряда

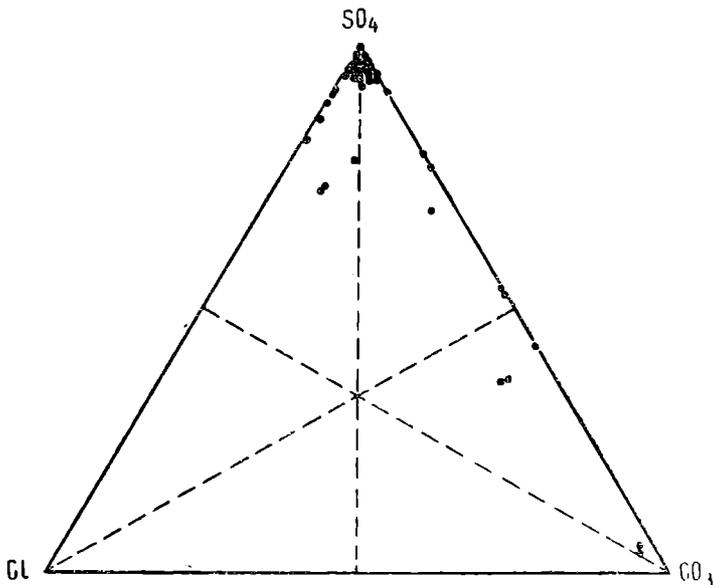


Рис. 16. Диаграмма, показывающая относительные количества SO_4 , Cl и CO_3 в анализах 50 рудничных вод (по Э. Ходжу)

сульфидов по отношению к медной проволочке в дистиллированной воде (в вольтах).

Таблица 4

Потенциалы сульфидов по Готтшалку и Бючлеру

Марказит	+0,37	Галенит	+0,15
Аргентит	+0,23	Халькозин	+0,14
Халькопирит	от +0,18 до +0,30	Никелин	+0,02
Молибденит	+0,20	Домейкит	+0,01
Ковеллин	+0,20	Медь	0
Пирит	+0,18	Антимонит	от -0,17 до -0,60
Борнит	+0,17	Сфалерит	от -0,20 до -0,40

При погружении пары сульфидов в раствор между ними пойдет электрический ток и на сульфиде-аноде будет выделяться кислород, а на сульфиде-катоде — водород. В результате этого первый будет интенсивно окисляться, а второй

будет предохранен от окисления выделяющимся водородом. Например, в паре марказит — сфалерит анодом является сфалерит, который в соответствии с этим будет в присутствии марказита окисляться значительно интенсивнее, чем при его отсутствии; опыт показал, что в этом случае сфалерит окисляется в 10—14 раз быстрее, чем один в водно-воздушной обстановке. Наоборот, для марказита в опытах была получена, в согласии с теорией, другая картина: один он окислялся в 4—6 раз быстрее, чем в контакте со сфалеритом. В результате этого при окислении руды, состоящей из сфалерита и марказита, раствор обогатится цинком, но будет беден железом. В природных условиях, когда взаимодействует несколько пар минералов и когда состав растворов существенно меняется, картина значительно усложняется; этот вопрос пока недостаточно выяснен и требует дальнейшего изучения.

Роль электрохимических явлений не ограничивается лишь влиянием их на окисление сульфидов, а, по-видимому, гораздо универсальнее. Так, некоторые исследователи доказывают, что под влиянием разности потенциалов, возникающих между сульфидами в водной среде, даже при отсутствии свободного кислорода происходит их растворение, которое приводит к образованию растворов, существенно отличающихся от состава растворов, образующихся за счет окисления сульфидных руд. Ряд подобных примеров и данные проведенных экспериментов опубликовал недавно Г. Б. Свешников¹.

Так, на Рудном Алтае, на участках глубоко залегающих полиметаллических месторождений, встречены водные ореолы рассеяния тяжелых металлов, характеризующиеся почти полным отсутствием сульфат-иона, слабым изменением величины рН, низкими содержаниями меди и железа по сравнению со свинцом и цинком. Если бы эти растворы образовались за счет окисления сульфидов, они должны бы иметь низкий рН, высокое содержание сульфат-иона, меди и железа — соответственно составу руд.

Подобные примеры аномалий известны и для других месторождений. Например, на медно-молибденовых месторождениях Армении Н. И. Долухановой были выявлены водные ореолы, характеризующиеся высокими концентрациями молибдена и пониженными содержаниями меди и же-

¹ Г. Б. Свешников. Электрохимическое растворение сульфидных руд и его роль в образовании водных ореолов рассеяния тяжелых металлов. 21 сессия Междунар. геол. конгресса. Геологические результаты прикладной геохимии и геофизики. Раздел I. Геохимия. Госгеолтехиздат, 1960.

леза, хотя в рудах соотношение концентраций этих металлов обратное. Г. Б. Свешников объясняет подобные примеры электрохимическим растворением сульфидов. Им экспериментально изучалось растворение полиметаллических руд, сложенных пиритом, халькопиритом, галенитом, сфалеритом, сульфидно-никелевых руд, представленных пирротинном, пентландитом, халькопиритом, а также руд, сложенных молибденитом, халькопиритом и пиритом. Во всех случаях наблюдалось интенсивное растворение более электроотрицательных минералов и соответственно обогащение растворов ионами тяжелых металлов, входящих в состав этих минералов. Электродные потенциалы сульфидов для растворов, имеющих рН около 7, что характерно для большинства природных вод, возрастали в такой последовательности: сфалерит (+0,12), молибденит (+0,14), галенит (+0,14, +0,29), пентландит (+0,22), пирротин (+0,25, +0,34), халькопирит (+0,33, +0,42), пирит (+0,37, +0,48), марказит (+0,48, +0,56)¹.

В случае мономинерального порошка галенита содержание ионов Pb^{2+} в растворах не превышало 4 мг/л; при наличии же смеси галенита с пиритом концентрация ионов свинца в растворе достигала 50 мг/л, т. е. за счет электрохимического растворения увеличивалась более чем в 10 раз. При наличии в смеси галенита, сфалерита, халькопирита и пирита в растворах во всех опытах были обнаружены в значительном количестве ионы свинца и цинка; ионов меди было значительно меньше, а железо практически отсутствовало.

Таким образом, водные ореолы рассеяния, образующиеся за счет электрохимического растворения, существенно отличаются от водных ореолов, образовавшихся в результате окисления сульфидов. Для ореолов электрохимического происхождения характерно невысокое содержание сульфат-иона и своеобразный химический состав вод, а также величины рН, близкие к составу фоновых вод района. На полиметаллических месторождениях эти ореолы обогащены свинцом и цинком, на сульфидно-никелевых — никелем, на медно-молибденовых — молибденом; медь и железо в этих водных ореолах присутствуют в малых концентрациях, хотя содержание их в рудах является высоким. Эти ореолы в чистом виде могут наблюдаться лишь в обстановке отсутствия свободного кислорода, т. е. по преимуществу на участках глубокого залегания сульфидных руд, что должно привлечь к ним особое

¹ Отличие приведенных цифр от старых данных Готтшалька и Бюллера объясняется, по-видимому, разным составом минералов и разными условиями опытов.

внимание, как к ценным индикаторам глубоко залегающих руд.

В отличие от ореолов электрохимического происхождения водные ореолы, образующиеся за счет процессов окисления сульфидных руд, характеризуются высокими концентрациями сульфат-иона и пониженной величиной рН; на полиметаллических месторождениях воды обогащены железом, медью (наряду с цинком и свинцом), на сульфидно-никелевых месторождениях — железом, медью и никелем, на медно-молибденовых — медью, железом и молибденом. Эти ореолы образуются лишь там, где есть свободный кислород, т. е. ближе к земной поверхности, чем ореолы электрохимического происхождения, однако и они часто образуются достаточно глубоко — на глубине сотен метров от поверхности, особенно если гидрогеологические условия и литологический состав пород являются благоприятными для миграции поверхностных газов, в том числе кислорода. В действительности, в природных условиях электрохимическое растворение сульфидов обычно сопровождается их окислением; поэтому чаще всего мы не наблюдаем указанных процессов в чистом виде, а имеем дело с их наложением, что значительно усложняет интерпретацию водных ореолов рассеяния, связанных с сульфидными месторождениями.

Области применения гидрогеохимического метода

Важным преимуществом гидрогеохимического метода, по сравнению с металлотметрической съемкой и биогеохимическим методом, является его относительно большая глубинность, достигающая часто нескольких сотен метров. Особенно удобно применять этот метод в горных районах, при наличии глубоко промываемых структур, когда на поверхность — по склонам гор и в долинах — выходят воды глубокой циркуляции, которые на своем пути могли встретить рудные тела или литохимические ореолы, связанные с этими телами. Опробование источников в этом случае позволяет довольно быстро выявить наличие соответствующих водных аномалий, связанных с рудами, залегающими иногда на глубине многих десятков и даже сотен метров (рис. 17).

Эффективен гидрогеохимический метод в условиях расчлененного рельефа и тогда, когда рудные тела перекрыты мощным покровом рыхлых отложений, но ореольные воды имеют возможность в пониженных частях рельефа выходить на поверхность (рис. 18, 19).

Иногда водные ореолы на поверхность не выходят и являются погребенными (рис. 20); это часто наблюдается среди осадочных месторождений, когда ореольными являются меж-

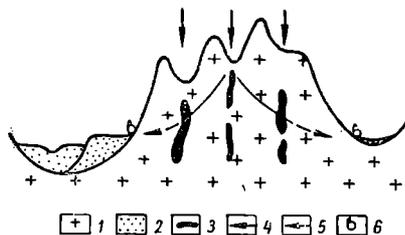


Рис. 17. Гидрохимические аномалии, связанные со слепыми рудными телами в горном районе с глубоко промываемыми структурами (по В. И. Красникову):

1 — коренные породы; 2 — аллювиальные отложения; 3 — слепые рудные тела; 4 — метеорные осадки и фоновые воды; 5 — ореольные воды; 6 — гидрохимические аномалии (выходы ореольных вод)

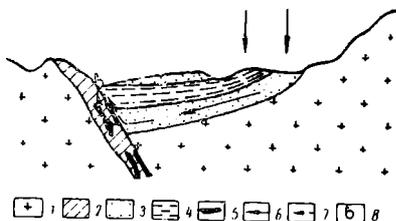


Рис. 19. Гидрохимическая аномалия, связанная с восходящими водами, омывающими слепые рудные тела (по В. И. Красникову):

1 — кристаллические породы; 2 — зона дробления; 3 — водопроницаемые породы; 4 — экранирующий водонепроницаемый горизонт; 5 — рудные тела; 6 — метеорные осадки и фоновые межпластовые воды; 7 — ореольные напорные воды; 8 — гидрохимическая аномалия

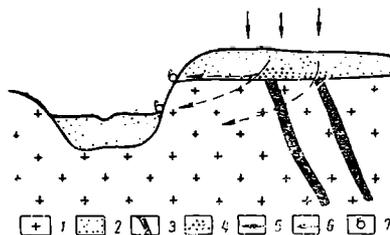


Рис. 18. Гидрохимическая аномалия, связанная с перекрытым месторождением и его погребенным ореолом в условиях расчлененного пенеплена (по В. И. Красникову):

1 — коренные породы; 2 — рыхлые отложения; 3 — рудные тела; 4 — погребенный ореол; 5 — метеорные осадки и фоновые воды; 6 — ореольные воды; 7 — выходы ореольных вод

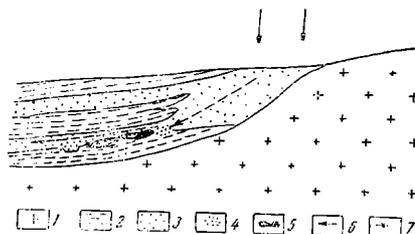


Рис. 20. Погребенный гидрохимический ореол в межпластовых водах (по В. И. Красникову):

1 — кристаллический фундамент; 2 — водонепроницаемые осадочные толщи; 3 — водопроницаемые породы; 4 — первичный рудный ореол; 5 — рудное тело; 6 — метеорные осадки и фоновые межпластовые воды; 7 — ореольные воды

пластовые воды. В подобных случаях необходимо принудительное вскрытие подземных вод путем, например, неглубокого бурения. Вообще говоря, до последнего времени при

гидрогеохимических поисках обычно ограничивались опробованием доступных непосредственному наблюдению родников и открытых водотоков; ясно, что при этом вероятность встретить водные ореолы рассеяния была относительно невелика. Эта вероятность значительно возрастет, если широко применять принудительное вскрытие подземных вод, задавая неглубокие буровые скважины в соответствии с геологией местности.

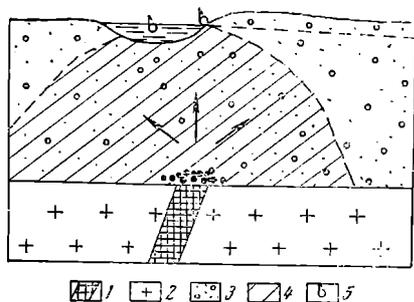


Рис. 21. Схема диффузионного гидрохимического ореола над погребенным рудным телом (по В. И. Красникову):

1 — рудное тело; 2 — коренные породы; 3 — рыхлые отложения; 4 — диффузионный геохимический ореол; 5 — выходы ореольных вод

Иногда погребенные ореольные воды, если они залегают неглубоко, могут в результате капиллярного подъема и диффузии создать диффузионные ореолы рассеяния в окружающих рыхлых отложениях, которые, таким образом, могут служить индикаторами неглубоко залегающих рудных тел (рис. 21).

Другим важным положительным моментом гидрогео-

химического метода является обычно большая протяженность водных ореолов и потоков рассеяния элементов, достигающая, как правило, нескольких километров и значительно превосходящая протяженность не только самих рудных тел, но и связанных с ними первичных и вторичных литохимических ореолов. Это позволяет выявлять водные ореолы рассеяния относительно небольшим числом проб, что особенно важно при поисках месторождений, не выходящих на земную поверхность, а также при рекогносцировочных поисковых работах в новых районах.

Наряду с указанными преимуществами гидрогеохимического метода он имеет и существенные недостатки. Основной из них — это трудность интерпретации гидрохимических аномалий, обусловленная их большой протяженностью, а также наличием значительного числа ложных аномалий, не связанных с месторождениями и образующихся иногда за счет обычных содержаний этих элементов в окружающих породах в результате ряда причин, вызывающих обогащение этими элементами природных растворов. Существенным недостатком является также колебание концентраций химических

элементов в пределах водных ореолов и изменчивость натурального фона, вызванные, например, изменением климатических условий и некоторыми другими причинами. Поэтому концентрации элементов в водах сильно меняются со временем, особенно в связи с количеством выпавших осадков; этим гидрогеохимический метод существенно отличается от металлометрической съемки. Этот недостаток можно в значительной мере устранить, если отбор проб и в пределах ореолов, и за их пределами производить примерно в одно и то же время, т. е. по возможности в одних и тех же условиях.

Применение гидрогеохимического метода поисков наиболее рационально в районах, где по условиям рельефа на поверхность выходят подземные воды глубокой циркуляции, т. е. в горных районах с резко расчлененным рельефом и хорошо развитой гидросетью, а также в пределах плато и равнин с омоложенной гидросетью, прорезающей покров молодых отложений и выводящей на поверхность погребенные водные ореолы месторождений, расположенных под этим покровом. Можно применять этот метод и в закрытых районах, там, где водные ореолы непосредственно сами не выходят на поверхность; в этом случае необходимо принудительное их вскрытие буровыми скважинами. Гидрогеохимические поиски можно проводить при геологических съемках и поисках средних и мелких масштабов (1 : 100 000 — 1 : 200 000 и мельче), когда достаточно опробования по редкой сети; при обильном числе естественных или искусственных водосточников можно указать работы проводить и при съемках более крупных масштабов, сгущая сеть опробования.

Помимо поисков конкретных месторождений полезных ископаемых гидрогеохимический метод может быть использован также для характеристики металлогенических особенностей достаточно обширных территорий, что подтверждается некоторыми проведенными исследованиями.

Действительно, металлогенические особенности районов достаточно отчетливо проявляются при гидрогеохимических исследованиях по наличию элементов-индикаторов. Так, например, в пределах молибденоносных провинций молибден является характерным элементом водных ореолов и потоков рассеяния, связанных не только с собственно молибденовыми месторождениями, но также и с полиметаллическими. Это доказано для Кураминского хребта в Средней Азии, для Кавказа, Восточного Забайкалья и других районов СССР. За пределами молибденоносных провинций, как показали исследования в Южном Приморье и в других районах, вод-

ные ореолы около полиметаллических месторождений не показывают повышенных содержаний молибдена. Та же закономерность выявлена для мышьяка и сурьмы: в пределах соответствующих провинций они обнаруживаются в повышенных концентрациях в водных ореолах не только в связи с мышьяковыми и сурьмяно-ртутными месторождениями, но также и в связи с полиметаллическими, как показали исследования в Восточном Забайкалье и Южном Приморье, для которых наличие указанных элементов является характерной металлогенической особенностью. По данным Ю. Ю. Бугельского, на свинцово-цинковых месторождениях Восточного Забайкалья содержания в водах мышьяка, а иногда и сурьмы превышают содержания в них свинца, хотя в рудах месторождений наблюдаются обратные соотношения. Это связано с более высокой миграционной способностью первых элементов по сравнению со свинцом, объясняемой их электрохимическими особенностями. Различной миграционной способностью отличаются цинк и свинец, поэтому в водных ореолах свинцово-цинковых месторождений цинк присутствует обычно в очень высоких концентрациях, а свинец — в весьма малых в соответствии с низкой растворимостью сульфата свинца. Особенно в этом отношении отличаются молибден и медь; как показали В. И. Виноградов и Н. И. Долуханова, на медно-молибденовых месторождениях Средней Азии и Армении образуются ярко выраженные ореолы рассеяния молибдена при очень низких содержаниях в водах меди. Так, в водах месторождения Каджаран (Армения) содержание MoO_4 выше $0,4 \text{ мг/л}$, иногда достигает 10 мг/л (рис. 22), а медь содержится обыкновенно в тысячных долях мг/л , редко достигая $0,02 \text{ мг/л}$.

Такая разница, как мы видели, может быть объяснена различием электрохимических потенциалов молибденита и халькопирита. Интересно отметить, что общий вынос молибдена подземными водами для Каджарана достигает нескольких килограммов в сутки или свыше тонны в год. Это очень большая величина, если учесть, что этот процесс выноса, правда менее интенсивный пока месторождение не разведывалось и не эксплуатировалось, продолжается многие тысячи лет. Подобные наблюдения были сделаны и для ряда других месторождений — молибденовых, полиметаллических, урановых и других; они также подтверждают существенный вынос различных металлов (молибдена, цинка, урана, меди и др.) из этих месторождений, с чем необходимо считаться по ряду соображений. Подсчеты показывают, что за относи-

тельно короткое в геологическом понимании время, измеряемое тысячами, а тем более миллионами лет, подземными водами из месторождений может быть вынесено такое количество металлов, которое может быть соизмеримо с их запасами, а в ряде случаев и значительно превосходит эти

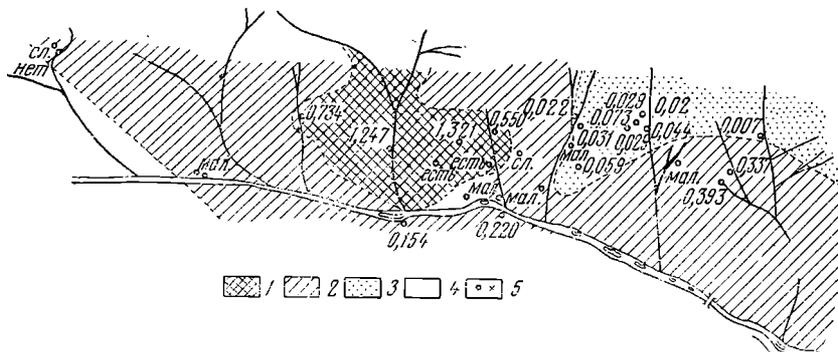


Рис. 22. Распределение содержаний $\text{MoO}_4^{''}$ в воде (по Н. И. Долухановой): 1 — выше 0,4 мг/л; 2 — от 0,1 до 0,4 мг/л; 3 — меньше 0,1 мг/л; 4 — $\text{MoO}_4^{''}$ отсутствует; 5 — опробованные источники (o) и водотоки (x)

запасы. Другими словами, размеры месторождений и их запасы, характерные для этих месторождений в настоящее время, вначале, после образования месторождений, были значительно большими; сейчас мы имеем по существу лишь то, что сохранилось от месторождений в результате длительного выноса из них подземными водами различных компонентов. Этот вынос из разных частей месторождений в зависимости от различия гидродинамических условий был конечно различным: одни части могли практически почти не разрушаться, другие подверглись интенсивному разрушению; особенно ярко это проявилось в зонах окисления сульфидных месторождений. Но и ниже этих зон, даже при отсутствии свободного кислорода в водах, растворение руд за счет электрохимических процессов, правда, менее интенсивное, также имеет место; это подтверждается как имеющимися полевыми наблюдениями, так и проведенными экспериментами.

Таким образом, обобщая все сказанное, можно утверждать, что разрушение месторождений подземными водами будет иметь место всегда, когда эти воды на своем пути встречают эти месторождения; скорость разрушения отдельных их частей будет при этом различной в зависимости от степени доступности их для проникающих растворов и со-

става последних (наличия или отсутствия растворенного кислорода, величины рН, наличия в растворах компонентов, способствующих выносу данных элементов или, наоборот, препятствующих этому выносу и т. д.).

В результате этого уменьшаются не только запасы месторождений, но меняется и распределение рудных компонентов: богатые вначале участки могут потом оказаться очень бедными, забалансовыми или даже совсем безрудными. Более того, известно, что подземные воды, обогащенные рудными компонентами в одних частях месторождений за счет их разрушения, могут при изменившихся физико-химических условиях отлагать свой полезный груз в других частях. Особенно наглядно это проявляется на сульфидных месторождениях, когда сульфатные растворы зоны окисления, опускаясь вниз, встречают первичные сульфиды и, взаимодействуя с ними, образуют зону вторичного сульфидного обогащения (зону цементации). Есть основания утверждать, что подобные явления перераспределения рудных компонентов имеют место и на других месторождениях, в том числе на месторождениях урана и ванадия; на этих месторождениях часто можно наблюдать новообразования карнотитов, тюамунитов, урановых черней и других минералов, выделяющихся из подземных вод по стенкам трещин и даже современных горных выработок. Возможно, что даже и так называемые «первичные руды» сульфидных месторождений в действительности несут на себе следы переотложений за счет вод глубокой циркуляции, но этот вопрос пока мало освещен.

Таким образом, выражаясь образно, мы можем сказать, что месторождения «живут»: они рождаются, внутри их идет перераспределение элементов, в результате чего они меняют свои формы, обмениваются своими элементами с окружающими геологическими телами, вследствие чего иногда продолжают расти, но чаще всего разрушаются и постепенно гибнут. Все это необходимо учитывать, изучая месторождения различных полезных ископаемых, их состав и морфологию и пытаясь воссоздать их генезис.

Роль растворов в формировании литохимических ореолов

Природные воды участвуют в формировании не только вторичных водных ореолов и потоков рассеяния. Миграция элементов в жидких фазах играет существенную роль и при формировании многих первичных ореолов рассеяния, например, связанных с гидротермальными месторождениями. Эти

ореолы образуются в результате тех же процессов, что и сами месторождения, контролируются теми же факторами минералообразования и составляют неотъемлемую часть самих месторождений. Сюда относятся по существу все зоны околорудных изменений вмещающих пород, связанные с рудными процессами: таковы процессы окварцевания, серицитизации, хлоритизации, пропилитизации, доломитизации, баритизации, пиритизации, лиственитизации, серпентинизации и оталькования, флюоритизации и т. д. Роль водных растворов в формировании этих ореолов не вызывает никаких сомнений, она, безусловно, имеет здесь решающее значение, так же как и в образовании самих месторождений. Но в отличие от вторичных водных ореолов рассеяния, где мы имеем дело обычно с нормальными, не нагретыми растворами, в случае околорудных изменений вмещающих пород мы предполагаем наличие горячих растворов, обладающих значительной химической активностью, с которой и связываем эти разнообразные и сложные процессы изменения вмещающих пород разного состава.

С повышением температуры, как известно, значительно возрастает упругость паров воды и летучесть многих соединений элементов; поэтому, говоря о происхождении, например, гидротермальных месторождений и окружающих их тех или иных первичных ореолов, мы обязаны учитывать перенос химических элементов не только в жидких фазах, но и в газообразных. Соотношения количеств элементов, мигрирующих в той или иной фазе, будут, очевидно, зависеть от летучести компонентов и от температуры растворов, возраста в связи с ростом как той, так и другой. Особенно показательна в этом отношении ртуть: упругость ее паров (при нормальном давлении) при 0° равна $0,00019$ мм, при 20° — $0,0013$ мм, при 100° — $0,285$ мм, а при $357,25^\circ$ достигает 760 мм. Следовательно, при температурах гидротерм значительная часть ртути будет находиться и мигрировать в парообразном состоянии, что имеет большое значение, так как способствует образованию широких ртутных ореолов вокруг месторождений, образованных не только киноварью, но и другими рудами, содержащими в тех или иных количествах ртуть.

Сказанное относится не только к ртути, но и ко многим другим элементам и их соединениям; поэтому при интерпретации околорудных изменений вмещающих пород необходимо считаться с переносом химических элементов как в жидкой, так и в газообразной фазах. Роль этой второй фазы, очевид-

но, будет особенно значительной при высокотемпературных процессах: при температурах выше 375°, т. е. выше критической точки воды, мы жидкой фазы практически иметь уже не будем и элементы будут мигрировать лишь в газообразном состоянии, вместе с парами воды. В этом надкритическом состоянии, как известно из опытов Н. И. Хитарова и других экспериментаторов, относительно легко переносятся даже такие труднотелучие соединения, как кремнезем, окислы олова, молибдена и других металлов. Так, для кремнезема Н. И. Хитаровым были получены следующие данные (в мг на 1 л пара):

t°	100	200	300	400	450
p , атм	1	16	87	288	399
SiO ₂ , мг	<1	67	100	165	203

На интенсивность переноса элементов в газовой фазе влияют также другие компоненты; добавка щелочи, например, значительно повышает содержание кремнезема в паре и газе воды, т. е. способствует его миграции. С указанными явлениями мы встречаемся в тех случаях образования месторождений и ореолов, когда есть основания предполагать наличие высоких температур; таковы, например, процессы грейзенизации и скарнообразования, в них перенос элементов осуществлялся, безусловно, при активном участии газовой фазы. При удалении в стороны от рудоподводящих каналов пары воды и газовые эманации, встречая более холодные боковые породы, естественно, будут охлаждаться, наряду с газовой фазой образуется жидкая, поэтому даже для наиболее высокотемпературных скарнов и грейзенов мы будем всегда иметь доказательства переноса элементов в той и другой фазе.

Первичные ореолы образуются одновременно с эндогенными месторождениями и контролируются теми же структурными факторами, что и последние. Поэтому при поступательном движении рудоносных растворов и флюидов по преимуществу снизу вверх указанные ореолы будут вытянуты в основном в том же направлении, что имеет большое практическое значение при поисках глубинных месторождений, так как при подобной ориентировке первичных ореолов создают-

ся наиболее благоприятные условия для выхода их на поверхность (в результате, например, последующих процессов эрозии). Сказанное подтверждается многими примерами изучения первичных ореолов рассеяния: протяженность их по вертикали часто достигает нескольких сотен метров и обычно значительно превышает протяженность их в горизонтальной плоскости вкрест простирания. Конечно, подобная закономерность особенно четко проявляется у ореолов, образованных в связи с крутопадающими рудными телами; у пологопадающих тел, перекрытых водоупорными породами, картина будет иная. Вообще же на форму ореолов, как уже отмечалось, исключительное влияние оказывают тектоника и литологический состав вмещающих пород, определяющие пути движения растворов.

Рассмотренные литохимические ореолы рассеяния образовались в результате миграции элементов в жидких и газовых фазах; для поисков этих ореолов, естественно, должны применяться уже те методы, которые позволяют обнаруживать литохимические ореолы, т. е. в первую очередь методы металлометрии.

Почвенно-гидрохимический метод поисков

Как известно, содержание элементов в почвах симбатно содержанию их в материнских породах, на которых эти почвы развиваются. С другой стороны, из исследований А. П. Виноградова и других известно, что содержание элементов в почвенных растворах коррелируется с содержанием их в самих почвах; на этом основан, в частности, биогеохимический метод поисков месторождений полезных ископаемых. Таким образом, изучение концентраций искомых элементов в почвенных растворах может служить своеобразной разновидностью металлометрической съемки; с другой стороны, поскольку в данном случае изучаются растворы, этот метод имеет общее с гидрогеохимической съемкой.

Он получил название почвенно-гидрогеохимического и разрабатывается у нас Н. И. Долухановой и другими исследователями. Этот метод заключается в отборе почвенных проб (0,2—0,3 кг) по определенной сетке, обычно с глубины 20—30 см (для оподзоленных почв до 40—80 см) с производством затем из них водных вытяжек и анализом их на искомые элементы и их индикаторы. Экспериментальные работы, проведенные Н. И. Долухановой на ряде медно-молибденовых месторождений Закавказья, показали, что

почвенно-гидрохимический метод позволяет выявлять аномальные участки так же, как и гидрогеохимический метод; ореолы рассеяния, выявленные обоими этими методами, показали удовлетворительное совпадение. Этот метод, естественно, представляет особый интерес для слабообводненных районов, где количество естественных выходов воды очень ограничено. Однако пока не ясны преимущества этого метода перед металлометрией, которая, как мы видели, позволяет весьма быстро и достаточно эффективно выявлять по существу те же ореолы. Есть основания думать, что почвенно-гидрохимический метод дает примерно те же результаты, что и биогеохимический, поскольку в том и другом случае средой миграции элементов являются почвенные растворы.

В том случае, когда растворы в результате диффузии и капиллярного подъема могут из коренных пород подниматься в перекрывающие их рыхлые аллохтонные отложения, почвенно-гидрохимический метод, так же как и биогеохимический, может оказаться достаточно эффективным.

Глава 6. ГАЗОВЫЕ (АТМОХИМИЧЕСКИЕ) МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Миграция элементов в газовой фазе является весьма распространенным явлением и в ряде случаев может быть использована при поисках месторождений некоторых важных полезных ископаемых, особенно месторождений каустобиолитов и радиоактивных элементов. Миграция газов может осуществляться как во время образования месторождений, так и в процессе их разрушения. При участии газовой фазы образуются многие месторождения полезных ископаемых, особенно высокотемпературные гидротермальные, пневматолитовые, контактовые, пегматитовые; при температурах, характерных для образования этих месторождений, многие элементы находятся в газообразном состоянии — в форме летучих соединений, особенно фторидов, хлоридов, боратов и т. д., в том числе как простых, так и комплексных. Образующиеся вокруг этих месторождений сингенетичные с ними ореолы рассеяния элементов были, следовательно, как и сами месторождения, в значительной степени атмосгенными, т. е. образовались из газов; в результате понижения температур и вследствие реакций между газообразными, жидкими и твердыми веществами образовались минералы указанных месторождений, состав которых хотя и косвенно, но указывает на то, что в их образовании существенную роль играли газовые эманации.

Вполне понятно, что перенос элементов в газообразной фазе обычно сопровождался и переносом их в жидкой фазе, в форме водных растворов, причем соотношение этих фаз ме-

нялось в зависимости от температуры: в надкритических условиях имел место лишь газовый перенос, при понижении температуры все более возрастала роль жидкой фазы.

Различные окolorудные изменения вмещающих пород — зоны скарнирования и грейзенизации, окварцевания, флюоритизации, турмалинизации и т. п., так же как и обычные сингенетические ореолы рассеяния элементов, являются, следовательно, в той или иной степени продуктами былых газовых подземных атмосфер, принимавших участие в формировании как самих месторождений, так и связанных с ними сингенетических ореолов, в том числе различных окolorудных изменений вмещающих пород.

Однако хотя указанные месторождения и их ореолы и связаны в значительной мере с миграцией элементов в газообразной фазе для их поисков мы не можем сейчас использовать газовые методы, поскольку характерные для этих месторождений элементы присутствуют в них в форме твердых минералов; здесь могут быть использованы методы металлометрической съемки, гидрогеохимии и биогеохимии. Газовые методы поисков можно применять лишь к объектам, которые либо сами в настоящее время представлены газами (например, месторождения горючих газов или гелия), либо же генерируют эти газы в результате тех или иных процессов. Эти процессы могут быть разными; для нефтей, например, это улетучивание некоторых углеводородов (метана, этана, пропана и др.), для радиоактивных элементов — спонтанный распад их ядер с образованием соответствующих эманаций: радона, актинона, торона, а также гелия.

Наибольшее значение газовые методы имеют при поисках залежей нефти и горючих газов, а также месторождений радиоактивных руд.

Остановимся для примера на геохимических методах поисков месторождений нефти, горючих газов и радиоактивных руд; миграция элементов в газовых фазах является по существу основой этих достаточно хорошо разработанных методов.

Газы нефтяных месторождений по условиям своего нахождения разделяются на четыре группы: а) газы, растворенные в нефтях; б) свободные газы; в) газы, растворенные в водах; г) газы, сорбированные вмещающими породами. Между всеми этими формами нахождения газов существует подвижное равновесие, определяемое в основном внешним давлением: при понижении давления уменьшается растворимость газов, при повышении — возрастает. Растворимость

различных газов в нефти и воде различна; наименее растворимы метан и азот, поэтому они преобладают в газовых шапках; в воде особенно хорошо растворим CO_2 , который поэтому и является характерным газом нефтеносных вод.

При вскрытии нефтеносных пластов в буровые скважины выделяются все свободные газы и частично газы, растворенные в нефтях и водах и выделяющиеся из них при уменьшении внешнего давления. Согласно имеющимся данным (А. А. Карцев, З. А. Табосаранский, М. И. Суббота, Г. А. Могилевский «Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений»), состав газов нефтяных месторождений варьирует в следующих широких пределах (табл. 5).

Таблица 5

Состав газов нефтяных месторождений (в %)

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2	H_2S
1—99	0,2—34	0,01—35	0—18	0,2—15	0—95	0—60	до 0,12

Эта таблица суммирует огромный материал чем и объясняются широкие вариации составов.

В составе газов нефтяных месторождений обычно преобладают углеводороды (метан и более тяжелые), затем идут углекислый газ, азот и сероводород, иногда отмечается водород. Кислород в газах нефтяных месторождений не встречается, он является для них «запрещенным» элементом.

Для целей поисков нефтяных и газовых месторождений из всех перечисленных газов наибольший интерес представляют, конечно, углеводороды, обычно являющиеся прямыми геохимическими индикаторами нефтяных и газовых залежей. Что касается других упомянутых газов (углекислый газ, сероводород, азот, водород), то они могут встречаться и вне связи с нефтяными залежами и поэтому использование их в качестве косвенных индикаторов для поисков нефтяных месторождений и залежей горючих газов встречает большие затруднения. Метан, важнейший из углеводородных газов нефтяных месторождений, иногда может образовываться и вне всякой связи с нефтью, например, на дне болот, где идет метановое разложение органических веществ без доступа кислорода («болотный газ»), в почвах и т. д. Очень важно также иметь в виду, что метан и некоторые другие углеводо-

роды могут образовываться не только в поверхностных условиях, но иногда и на значительных глубинах, среди интрузивных пород, что, например, имеет место в интрузивных массивах Кольского полуострова, газоносность которых специально изучал И. А. Петерсилье¹.

Поводом к постановке этих работ, проводившихся в период 1955—1957 гг., послужили вспышки горючих газов в горных выработках апатитовых рудников на Хибинских месторождениях. Исследование газов в породах Хибинского массива показало повсеместное наличие в них углеводородов, среди которых преобладает метан (85—95%), количество тяжелых углеводородов составляет 5—15%, всегда в небольших количествах присутствует водород (до 0,7%). По своему составу они близки к газам газовых, меньше нефтяных месторождений. Содержание углеводородов в пробах газа, отобранных из шпуров, достигает 18%. В породах, слагающих Хибинский массив, постоянно присутствуют углеводороды — метан, этан, пропан и бутан; общее их количество для разных пород меняется в пределах от 0,11 $см^3/кг$ породы (в пятнистых апатито-нефелиновых породах) до 50 $см^3/кг$ (в хибинитах). В Ловозерском массиве нефелиновых сиенитов также обнаружены повышенные содержания углеводородов (метана и др.) — до 5,95 $см^3/кг$. Метан встречен и в ультраосновных породах Мончегорского плутона (до 0,19 $см^3/кг$), тяжелые углеводороды здесь не обнаружены.

На основании того, что наблюдается зависимость содержания углеводородов от химизма вмещающих пород и отсутствует миграция этих газов из каких-либо осадочных формаций, автор приходит к выводу, что происхождение метана и других углеводородов в данном случае явно неорганическое — они образовались в щелочном магматическом расплаве. В породах встречаются также битумы, причем содержание их возрастает вместе с возрастанием концентраций углеводородов; такая связь, как правильно отмечает И. А. Петерсилье, свидетельствует об образовании битумов путем полимеризации молекул газообразных углеводородов.

В литературе имеется в настоящее время немало и других указаний на наличие метана и других углеводородов в объектах, исключаящих их органическое происхождение. Так,

¹ И. А. Петерсилье. Опыт применения геохимической съемки для исследования газоносности интрузивных массивов Кольского полуострова. В сб.: «Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений». Тр. Совещания по геохимическим методам. Изд-во АН СССР, М., 1959.

например, горючие газы встречены также в некоторых рудниках Швеции, Австралии и других стран среди докембрийских магматических и метаморфических пород. Метан часто присутствует в газах вулканов, жидкие углеводороды и твердые парафины известны в базальтовых лавах Этны и в лавах о. Явы. Каменные метеориты также содержат углеводородные газы (до 4,2% метана в газах, выделенных из метеоритов); анализ углистых разностей каменных метеоритов дает до 85% углерода и до 15—20% водорода.

В. И. Вернадский в свое время писал: «Далеко не всегда углеводороды связаны с жизнью. Есть метан, поднимающийся из более глубоких частей земной коры... Известные его синтезы в лаборатории чрезвычайно разнообразны и часто не зависят от органических соединений. Аналогичные процессы должны идти в магмах...»¹. Данный вопрос очень интересен с разных точек зрения. Во-первых, рассмотрение его показывает, что метан и другие углеводороды могут быть не только органического, но и неорганического происхождения, что имеет значение при обсуждении проблемы генезиса нефти и горючих газов. Во-вторых, что нас особенно должно интересовать, одно лишь наличие метана и других углеводородов (газов и битумов) еще не является доказательством их безусловной связи с залежами нефти; например, на Кольском полуострове, в пределах упомянутых нами массивов магматических горных пород, нефтяные залежи, безусловно, отсутствуют. Отсюда следует, что при поисках нефтяных и газовых месторождений методами газовой съемки необходимо учитывать не только наличие в подземных атмосферах углеводородных газов, но и ряд других геологических и геохимических моментов, которые помогают выяснить генезис этих газов. Помимо этого метан, как известно, является главной составной частью газов каменных углей, выделяясь из них в процессе их метаморфизма.

В связи с задачей разработки геохимических методов поисков месторождений нефти и горючих газов возник вопрос: как отличить газы, действительно связанные с нефтяными и газовыми месторождениями, от газов, которые с подобными месторождениями не связаны. В. А. Соколов, особенно много внимания уделивший прямым газовым поискам указанных месторождений, предлагает при решении этого вопроса руководствоваться следующими соображения-

¹ В. И. Вернадский. История минералов земной коры, т. 1, вып. 1. Госхимтехиздат, Л., 1933.

ми¹. Характерным отличием нефтяных природных газов является наличие в них наряду с метаном также повышенных количеств парафиновых углеводородов C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , в том числе изобутана. Для газов нефтяных месторождений среднее содержание этих тяжелых углеводородов C_2-C_4 составляет около 17%; для отдельных нефтяных месторождений содержание их иногда значительно меньше, но почти никогда не опускается ниже 2%; часто содержание тяжелых углеводородов в нефтяных газах поднимается выше средней цифры, достигая иногда 30—35%. В этом отношении углеводородные газы нефтяных месторождений существенно отличаются от газов угольных, чисто газовых и других подобных месторождений; в чисто газовых месторождениях концентрации тяжелых углеводородов обычно очень невелики — меньше 1% и лишь в очень редких случаях превышают 2%.

Газы каменноугольных месторождений состоят главным образом из метана. Тяжелые углеводороды здесь обычно отсутствуют, лишь иногда обнаруживается этан. В среднем концентрация тяжелых углеводородов в свободных каменноугольных газах меньше сотых долей процента, т. е. в тысячи раз меньше, чем их средняя концентрация в нефтяных газах. Правда, некоторое иногда повышенное количество тяжелых углеводородов нередко встречается в самом каменном угле, в сорбированном состоянии, но эти газы удерживаются весьма прочно и могут быть выделены лишь при нагревании в вакууме.

Что касается метановых газов, образующихся биохимическим путем в поверхностных слоях земной коры — в болотах, почвах, подпочвах и т. д., то в них содержание тяжелых углеводородов, по сравнению с газами нефтяных месторождений, также весьма мало. Изучение состава многих сотен болотных, почвенных и других газов биохимического происхождения показало, что примерно в 95% случаев содержание в них тяжелых углеводородов меньше 0,01%, чаще даже меньше 0,001%, в редких случаях оно поднимается до десятых долей процента, причем, как правило, эти случаи являются сомнительными (пробы отбирались в нефтеносных районах, результаты анализов не проверялись и т. д.). Эти выводы подтверждаются и проведенными опытами по бактериальному анаэробному разложению различных органических веществ; при этом всегда образуется много метана и совсем ничтожное

¹ В. А. Соколов. Научные основы геохимических методов поисков нефти и газа. В сб.: «Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений».

количество тяжелых углеводородов, что иллюстрируется следующими данными (по В. А. Соколову).

Таблица 6

Состав газов, образующихся при бактериальном разложении некоторых органических веществ (в объемных %)

Органические вещества	H ₂	CH ₄	Тяжелые углеводороды	CO ₂ +H ₂ S	N ₂
Крахмал	0,8	37,9	0,006	22,6	38,7
Клетчатка	0	69,4	0,001	14,0	16,5
Белок куриный	0	84,4	0,0006	2,2	13,4
Фитопланктон	0	25,5	0,001	9,6	64,9
Почва лесная	0	27,5	0,006	50,3	20,8

Метан образуется также в большом количестве при анаэробном распаде жирных кислот, аминокислот и т. д. Содержание его в газах, образующихся при анаэробном распаде органических веществ, всегда очень велико и обычно достигает 60—80%, иногда даже выше. По мнению В. А. Соколова, в подавляющем большинстве случаев концентрация тяжелых углеводородов по отношению к метану в биохимических газах меньше 1:10 000, может быть даже меньше 1:100 000. Так как содержание метана в подпочве (за пределами нефтеносных районов) составляет в среднем около 10⁻⁴%, а этот метан имеет явно биохимическое происхождение, можно, приняв указанное выше отношение, подсчитать, что содержание тяжелых углеводородов того же происхождения в этих газах будет порядка 10⁻⁸%. Действительно, специальные исследования показали, что концентрации тяжелых углеводородов в подпочве меньше 10⁻⁶%; более точно установить натуральный фон для них пока не удалось ввиду недостаточной чувствительности применяемой аналитической методики.

Из всего сказанного вытекает важный в практическом отношении вывод: глубинные газы нефтяных и газовых месторождений содержат относительно много тяжелых углеводородов, чем резко отличаются от газов поверхностного биохимического происхождения, где концентрации тяжелых углеводородов обычно в миллионы раз меньше. Что касается газов, содержащихся в магматических горных породах, подобных газам Хибин и Ловозера, то они по составу углеводородов напоминают газы нефтяных и газовых месторожде-

ний; в них содержание тяжелых углеводородов хотя в среднем и меньше, чем в последних, но не настолько, как в газах поверхностного происхождения. Поэтому при поисках нефтяных и газовых месторождений необходимо помимо состава анализируемых газов учитывать также и общую геологическую и геохимическую обстановку, чтобы решить вопрос о происхождении этих газов.

Одним из важнейших вопросов, связанных с атмосферическими методами поисков месторождений полезных ископаемых, является вопрос о миграции газов — ведь лишь при наличии миграции, например, газы глубинных нефтеносных месторождений могут достигнуть земной поверхности и стать индикаторами этих залежей. От масштабов миграции газов зависит глубина источников этих газов, которые мы можем обнаруживать, используя газовые методы, т. е. глубина тех залежей нефти, природных горючих газов, радиоактивных руд и т. д., которые мы ищем. Миграция газов изучалась рядом исследователей, особенно детально в связи с поисками нефтяных и газовых месторождений; рассмотрение этих вопросов имеется в монографии В. А. Соколова «Миграция газа и нефти», вышедшей в 1956 г. и подытожившей результаты предыдущих исследований в этой области.

Свободные газы мигрируют через горные породы путем фильтрации и диффузии. Фильтрация газов осуществляется через поры и трещины, имеющиеся в том или ином количестве в любой горной породе. Особое значение при этом имеет коэффициент пористости, представляющий отношение объема пор к объему всей породы. Этот коэффициент сильно варьирует для разных пород и даже для одной и той же породы, взятой в разных местах, что видно из следующей таблицы.

Таблица 7

Коэффициент пористости различных горных пород

Порода	Пористость, % (от — до)
Граниты и гнейсы	0,02—0,56
Глинистые сланцы	0,49—7,55
Известняки и доломиты	0,53—45,4
Песчаники	3,5—28,3
Пески	6,0—47,5
Глины (сухие)	—до 47
Лесс	—до 46

Поры могут быть замкнутые и сообщающиеся; очевидно, что для фильтрации газа благоприятны лишь сообщающиеся поры; газы, находящиеся в замкнутых порах, не участвуют в фильтрации, но они могут диффундировать через вещество породы. Доля замкнутых пор в общей пористости различна; у некоторых пород она составляет 10—20%, а у каменных углей иногда свыше 50%. Скорость движения газов через поры будет, очевидно, тем меньше, чем меньше размеры пор, так как при этом возрастает сопротивление стенок движущимся молекулам газа. В пределе, когда размеры пор будут равны или меньше размеров молекул газа, фильтрация газа прекратится.

Фильтрация газа через пористые среды подчиняется закону Дарси, который математически выражается следующей формулой:

$$Q = \frac{KS(p_1^2 - p_2^2)}{2\mu h},$$

где Q — объем газа; S — площадь сечения; K — коэффициент проницаемости; p_1 и p_2 — давление газа на входе и выходе пористой среды; h — длина пути; μ — вязкость газа.

Коэффициент проницаемости K характеризует свойства породы, зависящие от пористости, размера и конфигурации пор и т. д. Этот коэффициент выражают в особых единицах — дарси, причем он варьирует в весьма широких пределах в зависимости от характера пород.

По данным, опубликованным В. А. Соколовым, коэффициент проницаемости для разных пород меняется следующим образом (табл. 8).

Таблица 8

Проницаемость горных пород	
Порода	Коэффициент проницаемости в миллиардах
Песчаники (Баку)	30—1400
Пески	до 2500
Глины	0,001—90
Известняки и доломиты	0,0007—2300

Различная проницаемость пород объясняется главным образом различным количеством замкнутых пор, затрудняющих фильтрацию; это количество, естественно, значительно

больше у некоторых песчаников, чем у песков, этим и объясняются наблюдаемые у них значительные различия в проницаемости. Сухая глина может обладать довольно значительной пористостью, а следовательно, и высоким коэффициентом проницаемости; по мере ее увлажнения поры все более и более заполняются водой и свободная фильтрация газа затрудняется, этим объясняется слабая проницаемость влажных глинистых пород. У них миграция газа осуществляется уже по преимуществу диффузионным путем.

Проницаемость одной и той же породы очень сильно варьирует по разрезу в зависимости от ряда причин; известны случаи, когда, например, проницаемость песчаника на протяжении 12 м менялась от 0,016 до 541,2 миллиарда, т. е. более чем в 30 тысяч раз. Г. И. Теодорович все породы по величине проницаемости подразделяет на 6 классов, каждый из которых меньше предыдущего в 10 раз. В I класс попадают очень хорошо проницаемые породы (K больше 1 дарси); во II класс — хорошо проницаемые породы (K от 0,1 до 1 дарси) и т. д.; в V класс — слабо проницаемые породы (K от 1 до 0,1 миллиарда) и, наконец, в VI класс — практически непроницаемые породы (K меньше 0,1 миллиарда).

Проницаемость песчаных, карбонатных и других пород сильно снижается, если к ним примешаны глинистые частицы; последние закупоривают промежутки между минералами. Наоборот, примесь посторонних минералов к глинистым отложениям значительно повышает их проницаемость.

Фильтрация газа особенно облегчается и ускоряется за счет трещиноватости пород. По существу почти все породы, за исключением рыхлых песков, галечников и т. п., обладают трещиноватостью того или иного происхождения (трещины сжатия, растяжения, скалывания, перекристаллизации, выветривания и т. д.). Поэтому миграция газов особенно легко осуществляется по зонам тектонических нарушений; в этом убеждают нас как современные выходы различных газов, так и многие месторождения, образовавшиеся при активном участии газовых эманацій. Ширина трещин изменяется от ничтожных долей миллиметра до нескольких сантиметров; в широких пределах изменяется и их протяженность — от сантиметров до нескольких километров. Большую роль в миграции газов играет также кливаж, облегчающий фильтрацию.

Изучение кернов горных пород и условий эксплуатации нефтяных и газовых месторождений показало, что трещиноватость пород в ряде случаев имеет решающее значение для

миграции газов (и нефти). Фильтрация газа, как следует из формулы Дарси, зависит также от разности давлений на входе и выходе пористой среды: если давление газа там и здесь постоянно, фильтрация прекратится. Скорость фильтрации зависит также от вязкости газа; выяснено, однако, что вязкость разных газов довольно близка; она относительно слабо меняется также в зависимости от изменения температуры и давления, поэтому в общем на фильтрацию газов оказывает несравненно меньшее влияние, чем проницаемость пород.

Миграция газов через горные породы может осуществляться не только в результате перепада давлений, т. е. путем фильтрации, но также и в результате диффузии, обусловленной различиями концентраций этих газов в разных участках пород. Если мы имеем два газа с одинаковым давлением и эти газы приведены в соприкосновение друг с другом, то постепенно в результате диффузии молекулы одного газа будут проникать в среду другого и наоборот до тех пор, пока оба газа не будут полностью перемешаны, т. е. пока концентрация любого из них в любом объеме пространства не будет постоянной. Здесь, следовательно, перемещение газов вызывалось не разностью давлений (они были одинаковы), а разностью концентраций, т. е. в данном случае имела место диффузия одного газа в другой благодаря собственному движению молекул. Подобные явления наблюдаются, как известно, у разных жидкостей и у разных твердых тел; находясь на контакте друг с другом, они также диффундируют, хотя здесь диффузия идет, конечно, гораздо медленнее, чем у газов. Если в разных породах имеются разные газы, то и при отсутствии перепада давления все эти газы будут диффундировать через стенки пород, стремясь выравнять свои концентрации. Диффузия газов в природных условиях может осуществляться через любые среды — твердое вещество пород, содержащиеся в породах воды или нефть, газовые включения.

Диффузия подчиняется тем же законам, как и теплопроводность; теорию диффузии впервые развил еще в 1855 г. Фик. Согласно первому закону Фика:

$$dQ = -DS \frac{dC}{dh} dt,$$

где dQ — количество вещества, например газа, диффундирующее за время dt ; S — площадь поверхности, через которую проходит диффузия; D — коэффициент диффузии;

$\frac{dC}{dh}$ — градиент концентрации C данного вещества в направлении h . Коэффициент диффузии D обозначает количество вещества, продиффундировавшего за единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентрации $\frac{dC}{dh} = 1$.

Основной величиной в приведенном уравнении является коэффициент диффузии D , который различен для разных газов и для разных сред.

Коэффициенты диффузии некоторых газов в воздухе и в воде при нормальных условиях приведены в табл. 9.

Таблица 9

Коэффициенты диффузии некоторых газов в воздухе и в воде

Газ	D в воздухе, $см^2/сек$	D в воде, $см^2/сек$
Метан	0,23	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Этан	0,18	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Пропан	0,14	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Бутан	0,08	—
Углекислый газ	0,14	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Кислород	0,17	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Водород	0,61	—

Таблица 10

Коэффициент диффузии метана в разных породах

Горные породы	D , $см^2/сек$
Глины из разных мест	$1,35-4,8 \cdot 10^{-6}$
Известняки из разных районов	$1,42-4,4 \cdot 10^{-6}$
Аргиллиты	$1,31-2,95 \cdot 10^{-6}$
Алевролиты	$3,9 \cdot 10^{-6}$
Песчаники	$1,07-4,8 \cdot 10^{-6}$
Мрамор	$2,23 \cdot 10^{-6}$

Из таблицы видно, что коэффициент диффузии углеродородных газов уменьшается с увеличением молекулярного веса. В воде скорость диффузии газов в тысячи и десятки тысяч раз меньше, чем в воздухе. В горных породах коэффициенты диффузии газов зависят от ряда причин, в том числе от размеров пор, от влажности пород и других. В воздушно сухих породах значения D , согласно определениям П. Л. Антонова, для метана находились в пределах $2,7 \cdot 10^{-4} - 10 \cdot 10^{-4} см^2/сек$, т. е. были в 200—800 раз меньше, чем для диффузии метана в воздухе. Для влажных горных пород были получены следующие значения D для метана (табл. 10).

Приведенные данные показывают, что диффузия во влажных породах протекает значительно медленнее, чем в сухих — в десятки и даже в сотни раз. Коэффициенты диффузии газов во влажных породах примерно на порядок ниже, чем в

воде. Коэффициенты диффузии для различных углеводородных газов, проникающих через одну и ту же породу, закономерно изменяются, уменьшаясь с возрастанием молекулярного веса в соответствии с приблизительным постоянством величины $D\sqrt{M}$, где M — молекулярный вес. Так, согласно исследованиям П. Л. Антонова, величина D в глине Кудинского карьера при 25% влажности имела для разных углеводородов следующие значения (табл. 11).

Скорость диффузии газов через твердые тела изучена мало, но она, по-видимому, ничтожна, по сравнению со скоростью диффузии через воду или влажные породы. Известно, например, что гелий диффундирует через кварц, базальт и стекло; диффузия через стекло известна также для водорода и других газов. Известна диффузия газов через металлы, причем для коэффициента диффузии D в металлах были получены значения порядка 10^{-9} — 10^{-10} $см^2/сек$, что в тысячи раз меньше, чем для коэффициента влажных горных пород. При повышении температуры коэффициент диффузии быстро возрастает приблизительно пропорционально квадрату абсолютной температуры (T^2), поэтому на больших глубинах, где господствуют высокие температуры, скорость диффузии в зависимости от указанной причины должна возрастать; но скорость диффузии будет уменьшаться при повышении давления, оно будет замедлять скорость движения молекул и будет сжимать вещество, препятствуя диффузии.

При фильтрации и диффузии газов необходимо считаться с явлениями растворения газов в природных водах и с явлениями сорбции их горными породами. Количество газа, растворяющееся в единице объема жидкости (Q), пропорционально давлению газа (P), т. е. $Q = \alpha P$. Это закон Генри. В формуле α — коэффициент пропорциональности зависит от свойств газа и свойств жидкости и носит название коэффициента растворимости или коэффициента Генри и зависит для данного газа и данной жидкости от температуры и дав-

Таблица 11
Коэффициенты диффузии разных углеводородов в глинах

Углеводороды	$D, см^2/сек$
CH_4	$3,95 \cdot 10^{-6}$
C_2H_6	$3,50 \cdot 10^{-6}$
C_3H_8	$2,67 \cdot 10^{-6}$
C_4H_{10}	$2,48 \cdot 10^{-6}$
C_5H_{12}	$1,55 \cdot 10^{-6}$
C_6H_{14}	$0,44 \cdot 10^{-6}$
C_7H_{16}	$0,15 \cdot 10^{-6}$
C_8H_{18}	$0,043 \cdot 10^{-6}$

ления. Коэффициенты растворимости в воде при 20° и давлении 1 атм равны: для метана — 0,033 объемов на объем воды, для этана — 0,047, пропана — 0,037, бутана — 0,036, углекислого газа — 0,87, азота — 0,016, кислорода — 0,031, сероводорода — 2,58. Растворимость газов зависит также от минерализации вод, уменьшаясь с ростом минерализации. Например, коэффициент растворимости метана в дистиллированной воде ($t=17^\circ$; $P=25$ атм) равен 0,0319; при тех же условиях, но в воде, содержащей 3 моль/л хлористого натрия, коэффициент растворимости составляет лишь 0,0109, т. е. уменьшается в 3 раза.

Растворимость углеводородных газов в нефти значительно больше, чем в воде; например, для метана коэффициент растворимости в нефти при нормальных условиях составляет около 0,3, т. е. почти в 10 раз больше, чем в воде; еще больше возрастает растворимость тяжелых углеводородов. Поэтому в нефтегазовой залежи мы наблюдаем разный состав свободного и растворенного в нефти газа: пропан и более тяжелые углеводороды ввиду особенно высокой растворимости в нефти будут находиться по преимуществу в нефти, в свободном же газе из углеводородов будут присутствовать главным образом метан, меньше этан и совсем мало будет других более тяжелых гомологов. Растворение газа в жидкости начинается с ее поверхности, а потом посредством диффузии газ постепенно насыщает весь объем жидкости. Если жидкость, насыщенная газом под большим давлением, попадает в условия низких давлений, что, например, имеет место при движении вод из глубин к поверхности или при движении магм кверху, растворимость газов уменьшается и они выделяются из жидкости то бурно, если переход к новым условиям произошел быстро (например, «вскипание лавы» при излиянии ее на поверхность), то медленно, если снижение давления происходило постепенно.

Помимо растворения газов в природных растворителях необходимо считаться с их адсорбцией минеральным и органическим веществом пород. При адсорбции газы поглощаются поверхностью твердого сорбента, образуя слой толщиной всего в одну молекулу. Изотерма адсорбции выражается известным уравнением Лангмюра:

$$\frac{x}{m} = \frac{abP}{1 + bP},$$

где x — весовое количество газа, сорбированное m граммами сорбента; P — давление газа; a и b — константы. При малых

давлениях величина адсорбции почти пропорциональна давлению и изотерма адсорбции выражается прямой линией, т. е. следует закону растворимости Генри. При больших давлениях вид изотермы адсорбции более сложный.

В природных условиях необходимо считаться с тем, что за длительное геологическое время газы, сорбированные на поверхности твердых тел, постепенно диффундируют в массу твердого вещества и поэтому полное насыщение сорбента наступает очень медленно; соответственно медленно происходит и десорбция. В этом отношении природные условия сорбции и десорбции существенно отличаются от лабораторных, где эти явления происходят очень быстро, в течение нескольких минут. Большое влияние на способность пород к сорбции часто оказывают влажность породы и содержащиеся в них органические вещества. При наличии воды имеет место растворение газов; сорбция в этом случае затруднена, так как молекулы воды покрывают частицы породы и препятствуют непосредственному контакту молекул газа и породы. Особенно велика роль органических веществ, содержащихся в горных породах. Как известно, сорбционная способность битуминозных и других углистых веществ гораздо выше, чем веществ минеральных, поэтому величина адсорбции той или иной породы будет в значительной степени определяться содержанием в ней органических веществ, их природой, а также характером распределения в породе, т. е. доступностью для газов.

Согласно проведенным разными авторами экспериментальным исследованиям, поглощение углеводородных газов разными породами путем сорбции относительно невелико; так, при нормальных условиях 1 г глины сорбировал 0,1 см³ метана и 0,3 см³ пропана, известняки поглощали еще меньше. По данным М. М. Элинсон, при нормальных условиях алевролит поглощал 0,059 см³ метана и 0,041 см³ азота на 1 г вещества; аргиллит соответственно 0,028 см³ метана и 0,004 см³ азота; песчаник — 0,029 см³ метана и 0,006 см³ азота. Эти данные были получены при $t=20-22^{\circ}$; при 0° сорбция была в несколько раз выше.

Так как величина адсорбции растет с увеличением давления (а при низких давлениях пропорциональна ему), при понижении давления на породу наряду с выделением газа из растворов, содержащихся в породе, будет иметь место десорбция газа. Таким образом, при проходке буровых скважин, когда давление около скважины значительно понижается, в нее будет поступать наряду со свободным газом также

газ, растворенный в воде или нефти, и газ, частично десорбированный из пород.

В. А. Соколов произвел подсчеты для величин диффузионного потока метана, основываясь на экспериментально полученных коэффициентах диффузии для разных пород. Величины этого потока (Q) даны в кубических метрах на 1 м^2 поверхности (при нормальном давлении) за 1 миллион лет (табл. 12).

Таблица 12

Диффузионный поток метана для разных пород

Породы	Q
Вода	2,30
Глины	19,41
Известняки	8—20
Мергели	4,5—15,5
Аргиллиты	3,6—20,6
Алевролиты	23,7
Песчаники	9—18,8
Мраморы	2,4

Следует отметить, что породы для экспериментов брались иногда с довольно значительных глубин (например, аргиллиты—с глубин 1790 м, песчаники—с глубин 1780 м), т. е. эти породы были достаточно уплотнены. Полученные данные указывают на то, что потери метана нефтяными или газовыми залежами за длительное геологическое

время могут быть очень значительными и иногда могут привести к полной дегазации залежи. Тяжелые углеводороды диффундируют, как уже было сказано раньше, несколько медленнее, чем метан. Для больших глубин (порядка 2—4 км) диффузионный поток должен быть снижен, главным образом за счет уплотнения глинистых пород. В. А. Соколов допускает, что для этих глубин средний диффузионный поток следует принять равным приблизительно $1 \text{ м}^3/\text{м}^2$ за 10^6 лет. Расчеты показали, что при подобном допущении за 35—50 млн. лет (с олигоцена — эоцена) произойдет полная дегазация месторождения с запасами в 30—50 млн. м^3 на 1 км^2 ; за 300—350 млн. лет (с девона) потери газа составят около 300 м^3 на 1 м^2 , т. е. соответственно $300 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ на 1 км^2 , что уже соответствует дегазации очень мощной залежи.

Помимо диффузии нефтегазовые залежи теряют газы также посредством фильтрации через трещины и путем растворения в подземных водах, которые могут уходить за пределы залежи и таким образом уносить и рассеивать газы. Поэтому потери газа залежами в действительности могут быть даже гораздо более значительными, чем в приведенных выше ориентировочных подсчетах В. А. Соколова, в связи с чем возникает вполне законный вопрос: почему сохранились неф-

газовые залежи в древних, например, девонских породах, насчитывающих свыше 300 млн. лет? На этот вопрос можно дать по крайней мере два ответа. Во-первых, можно предположить, что действительный возраст газовых скоплений значительно моложе, чем возраст вмещающих их пород; во-вторых, есть основания думать, что нефтегазовые залежи не только теряют углеводородные газы, но постоянно и пополняются ими за счет процессов газообразования в окружающих породах, содержащих органическое вещество. Здесь мы подходим к тому же вопросу, который невольно возникает и при рассмотрении некоторых случаев образования водных ореолов рассеяния около месторождений различных полезных ископаемых, в том числе особенно сульфидных. Вынос химических элементов из них, экстраполированный на большие промежутки геологического времени, также иногда наводит на мысль о том, что месторождения за это время не только разрушались, но и создавались, иначе пришлось бы приписывать этим месторождениям в ряде случаев едва ли возможные по своей грандиозности масштабы. Все это, безусловно, очень интересные и важные вопросы, касающиеся происхождения и бытия месторождений полезных ископаемых; они неизбежно возникают в связи с рассмотрением проблемы ореолов рассеяния, однако анализ их выходит за рамки настоящей книги, перед которой стоят более узкие и скромные задачи.

Методика газовой съемки при поисках нефтяных и газовых залежей

Методика газовой съемки хорошо разработана применительно к поискам нефтяных и газовых месторождений, а также месторождений радиоактивных руд. При поисках залежей нефти и горючих газов пробы обычно отбираются из мелких скважин глубиной 3—4 м, которые размещаются по профилям вкрест простирания структур. Расстояния между профилями берут от 0,5 до 2 км, а между точками отбора проб в пределах профилей от 100 до 300 м в зависимости от сложности геологического строения местности.

Когда нефтеносные площади невелики (рифовые массивы, некоторые соляные купола, имеющие сложное тектоническое строение), применяется сетка, при которой расстояние и между профилями, и между точками опробования не превышает 250 м. Если в процессе газовой съемки выявляются аномалии, они проверяются путем бурения дополни-

тельных контрольных скважин, расстояния между которыми, естественно, сгущаются. Бурение скважин для газовой съемки производится или вручную или специальными механизированными станками. Отбор проб газа производится из почвы с соблюдением обязательного правила — проба в процессе отбора не должна быть разбавлена атмосферным воздухом, что достигается применением специальных систем пробоотборников и насосов.

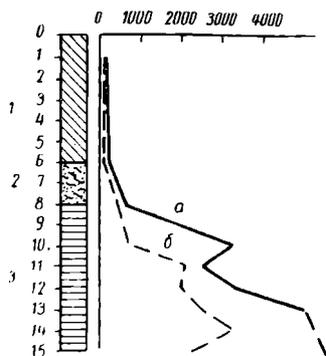


Рис. 23. Увеличение концентраций горючих газов с глубиной (по М. И. Суббота):

1 — четвертичные суглинки; 2 — глины понта; 3 — майкопские глины; а — суммарное содержание углеводородных газов (в CO_2); б — тяжелые углеводороды (в CO_2)

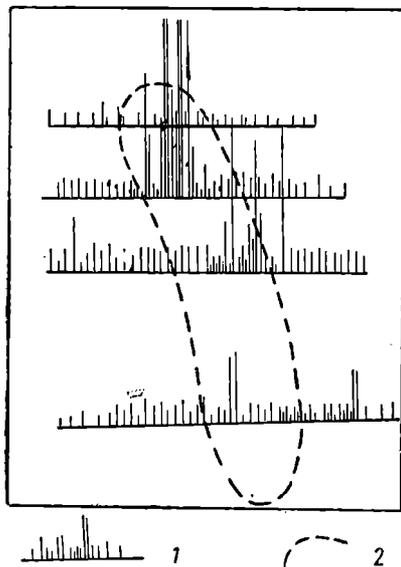


Рис. 24. Пример изображения результатов анализа газа на карте (по М. И. Суббота):

1 — концентрации тяжелой фракции; 2 — контур структуры

При глубинной газовой съемке (при детальных исследованиях) скважины бурятся на глубину 20—25 м, пробы отбираются примерно через 2,5 м. Карты с результатами газовой съемки составляются отдельно для каждой глубины, а также средние для всех глубин. Пробы, взятые с больших глубин, лучше характеризуют нефтегазовые залежи, чем пробы, взятые вблизи поверхности (рис. 23), поскольку здесь большую роль играют обмен с атмосферой и сезонные колебания в содержании углеводородных газов, вызванные образованием углеводородов в результате микробиологических процессов. Отобранные газовые пробы представляют сложные смеси; они анализируются затем специальными метода-

ми газового анализа, разработанными у нас В. А. Соколовым, Н. М. Туркельтаубом, М. Г. Гуревичем и др. Эти методы позволяют определять в газовой пробе метан и тяжелые углеводороды, а также азот, кислород, окись углерода, углекислый газ, водород. Современные приборы позволяют определять ничтожные количества тяжелых углеводородов ($10^{-6}\%$) с достаточно большой точностью.

Результаты анализов углеводородных газов наносятся на карту; иногда на одной карте различными цветами отмечаются и метан и тяжелые углеводороды; иногда для тех и других составляют разные карты. Наиболее важными показателями нефтеносности, как уже было сказано раньше, являются углеводородные газы, поэтому особого внимания заслуживает анализ геохимической карты, содержащей именно эти данные. Примером одного участка карты газовой съемки с нанесенными результатами анализа на тяжелые углеводороды является рис. 24, заимствованный из упоминавшейся неоднократно книги «Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений». На этом чертеже видно, что аномальные концентрации тяжелой фракции углеводородов довольно хорошо укладываются в пределы контура нефтеносной структуры.

На рис. 25 приведен один из профилей газовой съемки, проведенной на одном из месторождений Апшеронского полуострова; наиболее высокие концентрации углеводородных газов располагаются точно над нефтяной залежью, приуроченной к максимальному поднятию слоев.

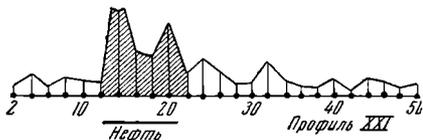


Рис. 25. Профиль прямой газовой аномалии. Масштаб пик: в 1 см — 0,00200% тяжелой фракции (по М. И. Суббота):

1—50 точки отбора проб

Газовая съемка при поисках радиоактивных руд

Другим примером использования газов для поисков месторождений полезных ископаемых является эманационная съемка, широко применяемая при поисках радиоактивных руд. Сущность ее заключается в следующем. Как известно, при радиоактивном распаде семейства урана-238 образуется радиоактивный газ — радон, урана-235 — соответственно актинон, тория — торон. Все эти три благородные радио-

активные газы являются изотопами эманации — элемента, занимающего 86-е место в периодической системе.

Указанные изотопы различаются скоростями распада: период полураспада у радона составляет 3,825 сут, у торона — 54,5 сек, у актинона — 3,92 сек. Отсюда вытекает, что наиболее далеко может мигрировать самый устойчивый из этих трех изотопов — радон; что касается торона, а тем более актинона, то скорости их распада настолько велики, что за время своего короткого существования они могут в природных условиях переместиться в стороны от породивших их урана и тория совсем незначительно, в соответствии с чем обычно ничтожно малы будут и создаваемые ими газовые ореолы рассеяния. Отсюда вытекает важный вывод: для поисков радиоактивных руд, залегающих на некоторой глубине от поверхности, практическое значение имеет лишь радон. Важное значение при этом имеет еще и то обстоятельство, что вследствие малой устойчивости актинон и торон аналитически определять значительно труднее, чем радон, что также приходится учитывать при проведении поисковых работ.

При измерении содержания радона за единицу принимают то его количество, которое находится в равновесии с 1 г радия (кюри). В природных условиях имеют дело обычно с очень небольшими концентрациями радона, для оценки которых применяют в качестве единицы эман, равный $1 \cdot 10^{-10}$ кюри. Иногда применяют также единицу махе (3,64 эмана).

Эманации, выделяемые радиоактивными элементами, содержащимися в минералах и горных породах, собираются в трещинках и порах и вместе с другими газами и растворами постепенно перемещаются на то или иное расстояние от эманлирующих минералов в зависимости от ряда причин, особенно же от устойчивости радиоактивных изотопов, составляющих эманацию.

Торон и актинон перемещаются при этом совсем незначительно; что касается радона, то при благоприятных условиях он может мигрировать на десятки метров, чаще всего на 6—8 м. Этим определяется «глубинность» эманационного метода, т. е. глубина от земной поверхности, на которой можно обнаружить урановые месторождения, пользуясь этим способом.

Практика поисков месторождений радиоактивных руд эманационным методом сводится в общих чертах к следующему. На площади, где по ряду геолого-геохимических сооб-

ражений есть основания предполагать на небольших глубинах от поверхности наличие указанных месторождений, производят отбор проб почвенного воздуха из небольших бурок глубиной около 50—100 см, используя для этих целей специальные насосы. Воздух, откачанный из бурок, поступает затем в камеру эманометра — специального прибора, где производится определение концентрации эманации путем измерения силы ионизационного тока, вызываемого ею в этом приборе.

Ионизация воздуха в эманометре может, вообще говоря, вызываться всеми тремя изотопами эманации — радоном, актиноном и тороном; поэтому необходимо уметь правильно определить истинную причину ионизации воздуха. Влияние актинона при эманационной съемке можно практически вообще не учитывать, так как содержание его в смеси с радоном очень мало, а скорость распада весьма велика. Что касается торона, то в случае ториевых месторождений, в непосредственной близости от них, его концентрация в почвенном воздухе может быть больше, чем концентрация радона. Чтобы решить вопрос о том, с каким видом эманации мы имеем дело, необходимо отсчеты на эманометре, показывающие силу ионизационного тока, произвести 2 раза: первый раз — сразу же после того, как воздух был накачан в эманометр, и второй раз — через 3—5 мин после этого. В случае торона второй отсчет будет в несколько раз меньше, чем первый, так как концентрация торона за это время сильно уменьшится (за 54,5 сек она уменьшается в 2 раза). Если же мы имеем дело с радоном, то, очевидно, оба отсчета будут почти одинаковыми, поскольку количество радона за это время уменьшится очень мало. В случае руд, содержащих одновременно и уран и торий, картина будет несколько более сложной, но производя 2 отсчета и учитывая скорость распада радона и торона, нетрудно вычислить и их относительное соотношение в смеси изотопов.

Практически особый интерес в настоящее время представляют урановые руды, поэтому особенно важно доказать в составе эманации наличие радона, что очень легко сделать, используя метод двух отсчетов.

Результаты измерения радиоактивности почвенного воздуха наносятся затем на геологическую карту. На фоне обычных значений радиоактивности почвенного воздуха, не связанной с месторождениями урана и обычно измеряемой десятными долями эмана или немногими эманами, в случае месторождений на карте должны выявиться аномальные

участки с повышенной активностью. В пределах аномалий, вызванных урановыми рудными телами, залегающими на небольших глубинах (до 5—8 м), содержание эманации обычно измеряется десятками, сотнями и даже тысячами эман. Если рудные тела залегают на больших глубинах, эманация не успевает дойти до поверхностных слоев, из которых отбирают пробы почвенного воздуха и, следовательно, в данном случае указанным методом обнаружить эти тела становится невозможным. Конечно, можно отбирать пробы воздуха с больших глубин, если, например, бурить для этой цели специальные буровые скважины; в этом случае глубинность эманационной съемки значительно возрастет, но одновременно сильно возрастет и ее стоимость. Иногда на это приходится идти; в ряде случаев для этих целей можно использовать уже имеющиеся буровые скважины, проходимые, например, при поисках нефти, каменного угля и других полезных ископаемых.

При интерпретации результатов эманационной съемки важно учитывать коэффициенты эманирования горных пород и руд, т. е. способность их выделять в окружающее пространство образующиеся в них эманации.

Коэффициенты эманирования различных руд и пород варьируют в весьма широких пределах — от долей процента почти до 100%, т. е. иногда высвобождается лишь очень небольшая часть эманации, иногда она выделяется почти полностью.

В результате этого могут, с одной стороны, образоваться радоновые аномалии и при отсутствии месторождений, за счет обычных содержаний урана в горных породах, если коэффициенты эманирования достаточно высоки; с другой стороны, при низких коэффициентах эманирования урановых минералов контрастные аномалии могут не образоваться даже и в том случае, если концентрации урана достаточно высоки. Со всем этим следует считаться при расшифровке результатов эманационной съемки.

Следует также иметь в виду, что если породы, перекрывающие рудные тела, содержащие радиоактивные элементы, являются весьма пористыми и трещиноватыми, то эманация свободно уходит в атмосферу, не давая повышенных местных концентраций. Очевидно, что это особенно легко происходит из самых верхних слоев почв и грунтов; в связи с этим концентрация радона с глубиной постепенно возрастает и обычно лишь на глубине около 5 м достигает постоянной величины, отвечающей концентрации радиоактивных элемен-

тов в породах или рудах, залегающих ниже точки наблюдения.

Для поисков радиоактивных руд можно использовать также и другой газ — гелий — продукт распада урана и тория. Гелий, являясь стабильным инертным легким газом, представляет идеальный мигрант; образуясь при спонтанном распаде радиоактивных элементов и высвобождаясь из содержащих их минералов, он легко мигрирует вверх от рудных залежей, практически не расходуясь на своем пути, чем он выгодно отличается от рассмотренных выше химически активных углеводородных газов нефтяных месторождений и от нестойких эманаций — радона, торона и актинона. Поэтому, над месторождениями радиоактивных руд мы имеем все основания ожидать наличие гелия радиогенного происхождения, генетически связанного с этими рудами; в данном случае мы можем, следовательно, рассматривать гелий как прямой индикатор залегающих на глубине руд урана или тория. В действительности дело обстоит значительно сложнее, так как гелиевые аномалии могут быть связаны не только с месторождениями радиоактивных руд, но и с любыми, особенно кислыми, изверженными породами, в которых содержатся в повышенных количествах уран, радий и торий в тех или иных формах.

Так как массы этих горных пород обычно в огромное число раз превосходят массы рудных тел, то и суммарное количество радиоактивных элементов, заключенных в рассеянном состоянии в указанных горных породах, будет, как правило, во много раз больше, чем в месторождениях. Поэтому, в соответствующих геологических условиях мы будем иметь подземные газовые атмосферы, характеризующиеся аномально высокими концентрациями гелия, не связанные с месторождениями радиоактивных руд, а обязанные урану, радю и торю, рассеянным в горных породах.

Это необходимо учитывать, проводя гелиевую съемку с целью поисков месторождений радиоактивных руд. Очевидно, что и здесь, как и в других аналогичных случаях, расшифровке гелиевых аномалий помогут другие прямые и косвенные геохимические индикаторы и критерии; среди них наиболее надежным, очевидно, явится эманация. Однако, как мы видели, эманационная съемка может указать на рудные тела, залегающие лишь недалеко от земной поверхности. При поисках более глубинных месторождений большое преимущество имеет гелиевая съемка, поскольку гелий может подниматься с каких угодно глубин. Но в этом заключена,

с другой стороны, и трудность в расшифровке гелиевых аномалий: среди гелия, который мы фиксируем измерительными приборами около земной поверхности, доля связанного непосредственно с рудными телами может быть и очень большой, и очень малой в зависимости от степени радиоактивности вмещающих, подстилающих и перекрывающих горных пород, их пористости и трещиноватости, размеров месторождения и т. д. Конечно, если месторождение урана или тория окажется относительно большим, доля гелия, связанного с ним, будет значительной и гелиевая аномалия действительно укажет на промышленные концентрации урана или тория; в случае небольших рудных тел задача расшифровки гелиевых аномалий соответственно значительно усложняется.

Глава 7. БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Давно уже было известно, что отдельные виды растений и вообще характер растительности могут указывать на обогащение почвы теми или иными химическими элементами. Так, например, еще в древности горняки знали, что на почвах, обогащенных цинком, особенно охотно произрастает особая галмейная фиалка. Давно было также известно, что солянка свидетельствует об обогащении почвы хлористым натрием, что наперстянка пурпурная предпочитает почвы, богатые марганцем, а над оловянными месторождениями особенно охотно поселяется живучка отпрысковая; известно было также о различии характера растительности, развитой на змеевиках, гранитах, апатитовых породах и т. д.

Некоторые специфические особенности растительности были отмечены в 1909 г. А. Е. Ферсманом при изучении минералогии о. Эльба. Он обратил внимание на резкое различие в характере растительного покрова в районах змеевиков, с одной стороны, и прорывающих их гранитов, с другой, и отметил, что эти чисто внешние различия были настолько значительны, что не надо было быть специалистом-ботаником, чтобы их подметить.

При картировании угленосных отложений неоднократно отмечалось отличие растительности, произрастающей на угленосных отложениях, от растительности, произрастающей над неугленосными свитами; так, на Сахалине было замечено, что на равнинах, сложенных третичными угленосными породами, преобладают смешанные леса из березы, ольхи и

ели, в то время как для районов, сложенных меловыми неугленосными породами, наиболее типичны хвойные леса.

Нами с А. Н. Лабунцовым при поисках первых промышленных месторождений апатитов на Кольском полуострове в 1926 г. было обращено внимание на то, что растительность над рудными залежами значительно более развита, чем над пустыми породами, что легко можно было заметить даже визуально на значительном расстоянии. Бросалось в глаза и то обстоятельство, что в долинах, куда поступал материал с разрушавшихся апатитовых месторождений, растительность в общем была более богатой, чем в тех долинах, где отсутствовало обогащение фосфором.

С. П. Александров при изучении в 20-х годах ураново-ванадиевого месторождения путем непосредственных анализов доказал, что некоторые виды растений, произрастающие в районе месторождения, существенно обогащены ванадием и ураном по сравнению с теми же видами, но произрастающими вдали от месторождения.

В Центральных Альпах кальцитовые жилы иногда легче фиксируются по флоре ботаниками, чем геологами. В лесной области Орлеана специфическая флора, указывающая на обогащение известью, была прослежена узкой полосой на многокилометровом протяжении; она существенно отличалась от флоры, развитой на остальной кремнистой почве. В дальнейшем оказалось, что указанная полоса представляла собой часть древней римской дороги, вымощенной известняком.

В 1938 г. С. М. Ткалич опубликовал в Вестнике Дальневосточного филиала АН СССР интересную статью под названием «Опыт исследования растений в качестве индикаторов при геологических поисках и разведках», в которой свел имеющийся литературный материал по этому вопросу и сформулировал некоторые положения теории биогеохимических методов поисков. Особое значение имели выдающиеся исследования В. И. Вернадского и А. П. Виноградова по геохимии биосферы; этими исследованиями были заложены основы новой науки — биогеохимии, выводы которой по существу и явились теоретической основой биогеохимического метода поисков месторождений полезных ископаемых. Много сделал в этом направлении Д. П. Малюга, многолетние работы которого по поискам месторождений кобальта, никеля и некоторых других рудных элементов явились существенным вкладом в теорию и практику биогеохимического метода поисков.

Несколько позднее были начаты исследования в этой области в зарубежных странах. Таковы работы К. Ранкама по использованию биогеохимического метода для поисков месторождений никеля в районах Финляндии, покрытых четвертичными ледниковыми отложениями; исследования Лейтвейна и Пфейфера на свинцово-цинковых месторождениях Саксонии, а также в области развития основных пород (работы по поискам кобальта, никеля и хрома); биогеохимические исследования В. Мармо (Финляндия) на медь, цинк, никель и молибден; работы Д. В. Карбух в рудном районе трех штатов (Канзас, Миссури и Оклахома) по распространению в растениях цинка, меди, свинца, никеля, олова, серебра и кобальта; исследования Т. В. Уоррена и Р. Е. Делава по биогеохимии железа, марганца и молибдена в британской Колумбии; работы Фохта в области ультраосновных пород, перекрытых ледниковыми отложениями, в Норвегии с целью поисков сульфидных месторождений меди, цинка и т. д.

Поиски месторождений полезных ископаемых биогеохимическими методами основаны, с одной стороны, на изучении содержаний искомых элементов в растениях, с другой стороны, на использовании растительного покрова и составляющих его сообществ и видов растений, как индикаторов подстилающих пород. В некоторых случаях при поисках используются микроорганизмы. Первый метод обычно называют собственно биогеохимическим, второй — геоботаническим, третий — микробиологическим. Если одновременно с растениями изучается и содержание элементов в почвах, комплексный метод называют почвенно-флористическим¹. Рассмотрим основы каждого метода в отдельности.

Собственно биогеохимический метод

В основе собственно биогеохимического метода лежат твердо установленные факты прямой корреляции между содержанием химических элементов в растениях и их содержанием в почвах и материнских породах, за счет которых эти почвы образовались.

Особенно детально эта идея была обоснована А. П. Виноградовым в его книге «Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах», вышедшей первым изданием в 1950 г. Согласно А. П. Виноградову, можно различать

¹ Иногда этот метод называют зольным, поскольку анализируется зола растений.

два основных вида концентрации элементов растениями: первый — когда все растения данной местности, характеризующейся повышенным содержанием того или иного химического элемента в почвах и горных породах, концентрируют его в своих тканях, и второй — видовой (или родовой), когда только определенный вид (или род) растений селективно среди других видов данного растительного сообщества исключительно высоко концентрирует данный элемент. Влияние высоких концентраций химических элементов в породах и почвах отражается не только на повышении концентрации этих элементов и растениях, оно отражается также на подборе самих растений, на появлении характерных для данной местности биоценозов и на морфологических изменениях как самих растений, так и животных, питающихся этими растениями. Провинции, характеризующиеся избыточным или недостаточным содержанием в породах и почвах того или иного химического элемента, что вызывает соответствующие биологические реакции у растений и животных, А. П. Виноградов предложил называть биогеохимическими провинциями. В их пределах обычно наблюдаются соответствующие изменения флоры и фауны, которые иногда носят характер эндемических заболеваний. Все эти обстоятельства должны учитываться при проведении биогеохимических поисков.

В растениях современными методами анализа обнаружены почти все известные в природе элементы периодической системы. Известно, что растения поглощают элементы из почвы не в тех пропорциях, в каких они содержатся в ней, а обладают избирательной поглотительной способностью, концентрируя некоторые из них. Это в первую очередь относится к тем элементам, которые играют в растениях определенную физиологическую роль, т. е. являются биогенными элементами, список которых в связи с успехами биологических наук все более и более расширяется. Но растения поглощают из почв в порядке принудительного ассортимента вместе с почвенными растворами и те элементы, физиологическая роль которых не ясна, а может быть даже отрицательна или безразлична. Но во всех изученных случаях, количество которых в настоящее время уже очень велико, содержание элементов в растениях является в определенных пределах симбатным их содержанию в почвах. Особенно возрастает содержание элементов в растениях в том случае, когда корни растений достигают рудных тел или участков породы, обогащенных рудными элементами, что, например, имеет место в случае первичных или вторичных ореолов и потоков рассея-

ния. Это может иллюстрироваться следующей таблицей, в которой приведены данные по содержанию ряда элементов в растениях, произрастающих на обычных почвах и над соответствующими месторождениями.

Таблица 13

Содержание некоторых металлов в золе нормальных растений и растений, произрастающих над месторождениями (в процентах, по А. П. Виноградову, 1954) (цифры округлены)

Химические элементы	Обычные растения	Растения над месторождениями	Степень концентрации (порядок)
Ванадий	$5 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-2}$	100
Хром	$5 \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10^{-2}$	100
Марганец	$1 \cdot 10^{-2}$	10	1000
Кобальт	$4 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-3}$	10
Никель	$1 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-2}$	100
Медь	$5 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-1}$	100
Цинк	$1 \cdot 10^{-2}$	1,0	100
Молибден	$5 \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10^{-2}$	100
Свинец	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	100
Уран	$n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-2}$	1000

Рассмотрение таблицы показывает, что в золе растений, произрастающих над месторождениями, содержания указанных элементов обычно в сотни, иногда даже в тысячи раз превышают средний натуральный фон для растений, произрастающих на обычных почвах. Изучение состава растений и почв показало, что биогеохимический метод может быть с успехом применен при поисках месторождений хрома, кобальта, никеля, меди, цинка, свинца, молибдена, серебра, олова, золота, ванадия, селена, бора и некоторых других элементов. Содержание этих элементов в обычных почвах и над месторождениями или их ореолами и потоками, как известно, очень сильно различается, что находит свое отражение и в составе растений, произрастающих над ними. В том случае, когда кларки концентрации элементов в месторождениях относительно невелики, что характерно для наиболее распространенных элементов, таких как кремний, алюминий, железо, магний, кальций, калий, натрий и другие,

мы не можем в общем случае ожидать и особенно контрастных значений для растений, произрастающих над обычными почвами и над месторождениями этих элементов. В этом случае биогеохимический метод, очевидно, не может дать, за исключением может быть отдельных случаев, положительных результатов. То же самое относится и к пирогеническим элементам, которые характеризуются ничтожной растворимостью своих соединений и поэтому, вне зависимости от их концентрации в твердых фазах, в почвенных растворах присутствуют всегда в более или менее одинаковых, всегда незначительных концентрациях. Таковы цирконий, торий, редкие земли и другие пирогенические элементы. Как мы видим, здесь наблюдается полная аналогия с гидрогеохимическим методом поисков, поскольку в том и другом случае мы имеем по существу дело с природными растворами. Эта аналогия распространяется и на упомянутые выше наиболее распространенные гидрогенические элементы (кремний, алюминий, магний и др.), поскольку их концентрации, как правило, и в обычных почвах достаточно велики, т. е. нет той контрастности в характере растворов, которая является необходимым условием для эффективного применения как гидрогеохимического, так и биогеохимического методов.

Как показали детальные исследования, не только различные растения, но и разные части одного и того же растения (корни, ветви, листья) обычно накапливают элементы в разных концентрациях. Так, И. Бабиčka¹, культивируя на пробах золотоносного шлама из Раудной (Чехословакия) кукурузу, обнаружил в отдельных ее частях следующие концентрации золота: в высушенных цветах — 2 г/т; в сухих листьях и стеблях — незначительные следы; в корнях — 0,3 г/т; в початках, лишенных зерна — 0,4 г/т и в зернах — 60 г/т. Высокое содержание золота в зернах кукурузы было обнаружено И. Бабичкой и Б. Немцем и в ряде других изученных случаев, в том числе в растениях, собранных на поле близ Осланы (Зап. Словакия), что и побудило указанных авторов заняться детальным изучением золота в организмах.

Шимпер и Риссе, изучая ярутку, нашли в золе корней 1,66% окиси цинка, в стебле — 3,28%, в цветах — 3,24% и в листьях 13,12%.

Проводя биогеохимические поиски, с целью опробования обычно берут наземные части растений, так как корни труд-

¹ И. Бабиčka. Золото в организмах. В сб.: «Геохимические методы поисков рудных месторождений», под ред. В. И. Смирнова.

нее отбирать и трудно отделить от частичек почвы. Растения с интенсивным водным обменом и с глубокой корневой системой, естественно, гораздо интенсивнее концентрируют в себе разные химические элементы и поэтому являются наиболее подходящими объектами для биогеохимических поисков. Растения извлекают химические элементы из почв, поэтому содержание того или иного элемента в растениях связано в общем прямой пропорциональностью с содержанием его в почвах. Однако распределение элементов по профилю почв подвержено значительным колебаниям и существенно различно для разных типов почв. Как правило, почвы сухих аридных областей — сероземные, бурые, каштановые и другие — промываются слабо и поэтому вынос металлов из верхних почвенных горизонтов у них проявляется незначительно. Гораздо сильнее промываются почвы влажных, гумидных областей — подзолистые, серые и бурые лесные, а также южные желтоземы. В этих почвах наблюдается обеднение металлами верхних горизонтов и обогащение ими иллювиального горизонта. Все это необходимо, как уже отмечалось ранее, учитывать при проведении металлометрической съемки, связанной в ряде случаев с отбором почвенных проб. Необходимо с этим считаться также и при биогеохимических исследованиях, особенно при сопоставлении их результатов с данными металлометрической съемки.

Интересные результаты в этом отношении были получены М. А. Глазовской, специально изучавшей содержание некоторых металлов в почвах разных типов. Содержание химических элементов в почвах, как это установлено многочисленными исследованиями наших и зарубежных почвоведов и геохимиков, зависит, с одной стороны, от состава материнских пород, за счет которых образуются почвы, с другой стороны, определяется сложными физико-химическими и биологическими процессами почвообразования. Это относится как к главным элементам почв, так и к тем металлам и редким элементам, которые присутствуют в почвах в ничтожно малых количествах и представляют особый интерес с точки зрения геохимических методов поисков. Вполне естественно, что наиболее ярко зависимость между содержанием элементов в почвах и материнских породах наблюдается на ранних стадиях почвообразования, в первичных почвах и маломощных почвах горных склонов. В самом начале почвообразовательного процесса содержание химических элементов в почвах должно приближаться к содержанию их в породах; в дальнейшем, в результате процессов физического, химиче-

ского и биологического выветривания происходит значительная миграция химических элементов, в результате чего одни элементы накапливаются в почве, другие из нее выносятся. Так, например, как показали М. А. Глазовская и Д. Н. Иванов, в первичных почвах, развивающихся на гранитах и диоритах Кавказа, содержание меди возрастает в 5—10 раз (с $0,3 \cdot 10^{-3} \%$ до $1,4—3,0 \cdot 10^{-3} \%$).

Интересно отметить, что в лишайниках, развивающихся на скалах и являющихся одними из первых их поселенцев, содержание меди достигало $18—52 \cdot 10^{-3} \%$, т. е. превышало содержание ее в указанных породах в 60—150 раз. Обогащение первичных почв, развивающихся на диоритах и гранитах Тянь-Шаня, было отмечено указанными авторами также для марганца, содержание которого увеличилось также в несколько раз (с $0,14—0,05$ до $0,39—0,70 \%$). Далее было замечено, что содержание меди в почвах возрастает параллельно с содержанием ее в породах, что иллюстрируется следующими цифрами (в тысячных долях процента):

сиенит	— 0,4,	почва — 3,1;
диорит	— 0,6,	почва — 3,4;
трахит	— 1,3,	почва — 4,6;
порфирит	— 2,0,	почва — 5,0;
базальт	— 2,4,	почва — 6,4.

Аналогичная зависимость ранее была установлена А. П. Виноградовым и Д. П. Малюгой для кобальта и никеля; ими было доказано закономерное возрастание содержания указанных элементов в почвах, развившихся на породах возрастающей основности в ряду гранит — диорит — базальт — габбро — серпентинит, начиная от $0,1$ до $10,0 \cdot 10^{-3} \%$ для кобальта и от следов до $50,0 \cdot 10^{-3} \%$ для никеля.

В хорошо развитых почвах, сформировавшихся на сильно выветрелых, переотложенных рыхлых отложениях, такой простой зависимости между содержанием элементов в почвах и породах часто уже не наблюдается; ее нарушили процессы интенсивного перемещения элементов. Содержание элементов в почвах зависит также от их механического состава. Так, например, для меди, кобальта, никеля, цинка, марганца и ряда других элементов доказано обогащение ими тонких фракций, что связано главным образом с процессами сорбции этих элементов высокодисперсными составными частями этих фракций — глинами, гидратами окислов, органическим веществом и т. д. В результате песчаные почвы, как правило, содержат значительно меньшие количества

указанных элементов, чем глинистые, что необходимо учитывать при металлометрических съемках и биогеохимических исследованиях. Существенное влияние на содержание элементов в почвах оказывают также физико-географические условия почвообразования, особенно климат, рельеф и характер растительности.

Роль климата как одного из важнейших факторов почвообразования достаточно хорошо выяснена давно, особенно школой русских почвоведов В. В. Докучаева, и нашла свое отражение в учении о зональности — одном из крупнейших теоретических обобщений почвоведения. Количество осадков и температура данной местности определяют скорость процессов выветривания, кислотность и щелочность растворов, их окислительно-восстановительные свойства, концентрацию в них разных элементов и характер растительности. Все это определяет ту или иную скорость миграции элементов и в конечном счете объясняет как накопление некоторых из них в определенных горизонтах почвенного разреза, так и вынос их.

Так, например, в условиях сухого климата — в степях и пустынях — водные растворы характеризуются щелочной реакцией и соответственно малой подвижностью железа, никеля, кобальта, марганца, цинка, меди и ряда других элементов, которые поэтому накапливаются в почвах. В районах с влажным климатом почвенные растворы характеризуются обычно нейтральной или слабокислой реакцией, что способствует выносу целого ряда элементов, в том числе кальция, меди, цинка, молибдена, урана, железа, марганца, кобальта и др.

Необходимо также учитывать, что довольно часто распределение элементов-индикаторов по профилю почв бывает крайне неравномерным и поэтому металлометрическая съемка, если пробы при ней отбираются с постоянной, заранее заданной глубины, иногда может давать искаженные результаты, не отвечающие среднему содержанию этих элементов во всем почвенном разрезе. В этом смысле использование растений имеет то преимущество, что они в общем могут более правильно отражать средний состав почвы, поскольку охватывают своей корневой системой весь профиль почвы, а не отдельный ее горизонт, что имеет место при металлометрии.

Биогеохимический метод имеет ряд преимуществ перед другими методами поисков также на площадях, перекрытых болотами, где применение как металлометрии, так и гидрогеохимии практически исключено, а сбор растений не пред-

ставляет особого труда. При этом необходимо учесть одно важное обстоятельство: сбор проб растений, особенно деревьев и кустарников, может производиться не только летом, но также и зимой, когда все покрыто снегом и льдом и когда, следовательно, становятся легкодоступными для проспекторской работы самые труднопроходимые в летний период болотистые места. Это обстоятельство пока не используется, но имеет, по нашему мнению, важное значение, значительно удлинняя сезон полевых геологических работ, который в северных районах является пока очень ограниченным во времени. Поэтому представляется весьма вероятным, что в недалеком будущем геологи, проводящие поиски месторождений полезных ископаемых в северных районах, свое обычное снаряжение дополнят лыжами и соответствующей зимней одеждой, чтобы проводить биогеохимические исследования также и в зимнее время. Для огромных северных территорий Советского Союза, пока еще крайне мало изученных, это должно иметь большое значение.

Значительные потенциальные возможности имеет и та разновидность биогеохимического метода, которую обычно называют геоботаническим методом и которая предполагает тесную кооперацию геохимиков с ботаниками. Выявление уже в полевых экспедиционных условиях тех или иных морфологических изменений в растениях, что для опытного ботаника не представляет особого труда, может служить первым предварительным и, может быть, очень полезным указанием на присутствие в почвах и подстилающих их породах повышенных концентраций тех или иных химических элементов, явившихся причиной этих морфологических изменений. Последующие более углубленные биогеохимические исследования, в совокупности с другими геохимическими, геологическими и геофизическими исследованиями, позволят потом проверить эти первоначальные геоботанические прогнозы.

Для иллюстрации изложенных выше общих положений приведем некоторые примеры применения биогеохимического метода для поисков месторождений полезных ископаемых.

Д. В. Карбух описал результаты своих исследований в рудном районе трех штатов США (Канзас, Миссури, Оклахома). Здесь имеются полиметаллические месторождения, залегающие среди известняков формации Бун, относящейся к верхам средней части миссисипской системы, которые на западе перекрываются пенсильванскими глинистыми сланцами. Главными рудными минералами являются сфалерит и галенит, в небольших количествах встречаются также пирит,

марказит и халькопирит. Известны два типа рудных тел — пластообразные залежи небольшой мощности, но значительные по площади и рудные тела неправильной формы, удлиненные, со значительными вертикальными размерами. Рудные месторождения непостоянны в контурах и показывают значительные колебания в содержании металлов; они приурочены к тем частям района, где была проявлена прединерализационная складчатость, сопровождающаяся расщелачиванием и брекчированием. Руды в общем небогатые, со средним содержанием цинка около 2—4% и свинца около 1%.

Биогеохимические исследования проводились на семи участках, причем отбирались по определенной сетке образцы деревьев и трав как над минерализованными зонами, так и на значительном удалении от них. Образцы мерилендского дуба отбирались на расстоянии 200 м один от другого, образцы трав брались с интервалом в 65 м. С деревьев срезали листья и ветви; травы срезались на высоте 30 см от земли, чтобы избежать загрязнения частицами почвы. Образцы растений высушивались на воздухе в течение месяца и больше, измельчались в ступке и затем сжигались в фарфоровых чашках на пламени бунзеновской горелки, пока не получался однородный серый пепел без частиц угля, на что требовалось около 15 мин времени. Цинк и медь определялись колориметрически, свинец, никель, олово, серебро и кобальт — спектроскопически. Точность определения составляла: для цинка $\pm 2\%$, для меди $\pm 11\%$, для свинца $\pm 10\%$, для никеля и олова $\pm 16\%$, для серебра $\pm 26\%$. Концентрация металлов выражалась в процентах от веса золы. Содержание металлов наносилось на планы, причем участки разных концентраций металлов заштриховывались разными значками (рис. 26).

В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы. Образцы, взятые с веток мерилендского дуба, произрастающего над минерализованными зонами или около них, содержат цинка в среднем на 67% больше, чем ветви тех же деревьев, собранных на участках, заведомо лишенных минерализации и находящихся на расстоянии нескольких миль от минерализованных зон. Образцы 24 видов деревьев (клен, черный орех, кизил, красный кедр, платан, разные дубы, черемуха, вяз и др.), собранные над минерализованными зонами, показали в среднем для листьев $119 \cdot 10^{-3} \%$ и для ветвей $100 \cdot 10^{-3} \%$ цинка. Аналогичные образцы с неминерализованных зон дали для листьев $86 \cdot 10^{-3} \%$ и для ветвей $80 \cdot 10^{-3} \%$ цинка, т. е. показали

снижение содержания цинка, по сравнению с первой группой, для листьев на 38 и для ветвей на 25%.

В образцах 16 видов трав с минерализованных зон содержание цинка оказалось в среднем на 30% выше, чем в

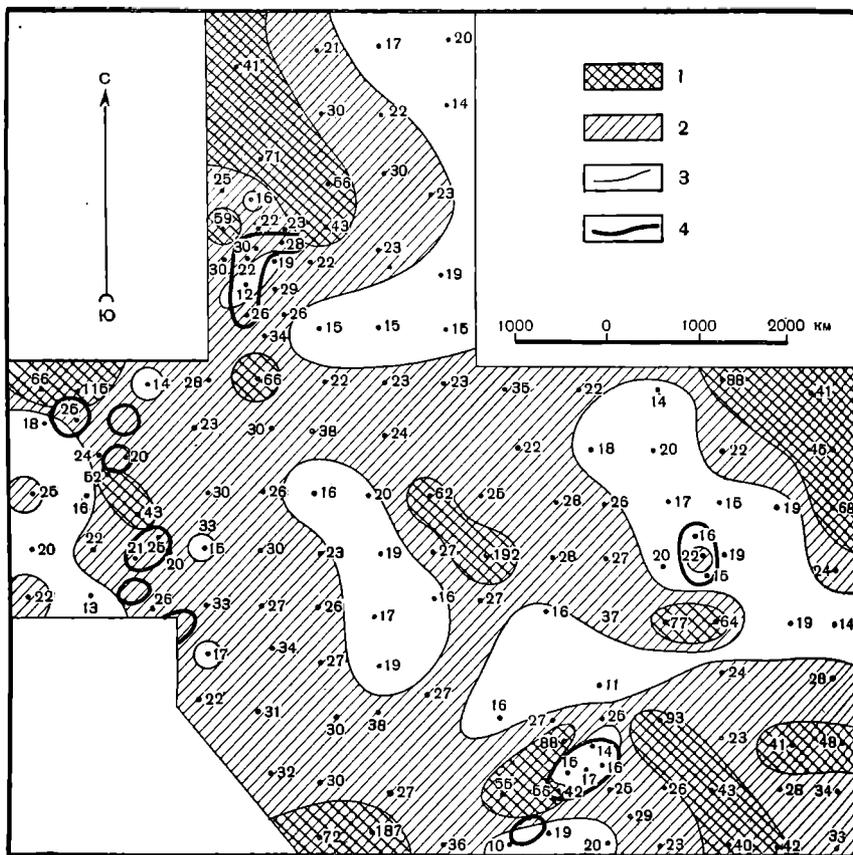


Рис. 26. Распределение свинца на участке Уинтворт (по Д. В. Карбух). Спектральные анализы золы ветвей *Quercus parilandica*, выраженные в $10^{-3}\%$:

1 — 41 и выше; 2 — 21—40; 3 — 0—20; 4 — граница минерализованных зон

аналогичных растениях, собранных на неминерализованных зонах (соответственно $152 \cdot 10^{-3}$ и $117 \cdot 10^{-3}$ %). Как следует из подробных опубликованных таблиц автора, отдельные виды деревьев и трав иногда отклонялись от общего правила, что, может быть, объясняется недостаточностью

количества взятых образцов (1—2), но общая закономерность, выведенная статистически, не оставляет сомнения в ее правильности. Приведенные автором цифры и планы показывают также, что распределение цинка в пробах из веток мерлендского дуба, взятых по сетке на площади в 2 кв. мили, хорошо увязывается с распределением выявленных геологическими методами минерализованных зон; содержание других металлов также увязывается с минерализованными зонами, но менее четко.

В результате автор приходит к выводу, что биогеохимические исследования, основанные на получении большого числа цифр, особенно по цинку, имеют существенное значение при поисках скрытой минерализации в районе указанных трех штатов, особенно на участках, где на поверхности обнажаются известняки формации Бун. Интересно отметить, что глубина залегания рудных тел на обследованной площади составляла около 20 м для одного участка, 22 м для другого и 30 м для третьего. Ясно, что корни растений, особенно трав, не могли достигать непосредственно самих рудных залежей; обогащение растений указанными металлами, очевидно, шло за счет ореолов рассеяния (первичных и вторичных), генетически связанных с месторождениями и более приближенных к поверхности, чем сами рудные тела.

В качестве следующего примера биогеохимических исследований приведем работы Д. П. Малюги на Кемпирсайском месторождении силикатного никеля на Южном Урале. Это месторождение приурочено к древней коре выветривания Кемпирсайского перидотитового массива. Размытая поверхность серпентинитов и более слабо измененных первичных пород перекрыта пестроцветными глинами и мергелями мощностью от 1 до 15 м. Грунтовые воды залегают на глубине 20—30 м, иногда они находятся ниже рудных тел. Рудные залежи имеют неправильную форму, часто образуют карманы. На породах, слагающих район месторождения (перидотиты, змеевки, глины, мергели), образовались каштановые почвы. Растительный покров в пределах рудного поля более бедный, чем вне его, что по аналогии с другими упомянутыми ранее массивами платиноносных и алмазозонных ультраосновных пород, очевидно, объясняется бедностью почв, развивающихся на ультраосновных породах, необходимыми для растений питательными веществами. У растений, произрастающих над никелевым месторождением, наблюдаются, по сравнению с обычными, значительные морфологические изменения, проявляющиеся в окраске цветов и фор-

ме листьев. Особенно значительны эти изменения у грудницы мохнатой — одного из наиболее распространенных растений южноуральских ковыльных степей. У этих же растений анализы золы показали и особо высокие содержания никеля, кобальта и меди, по сравнению с теми же видами, но взятыми вдали от месторождения. Так, в золе грудницы мохнатой, взятой над месторождением, содержание никеля составляло $2,2 \cdot 10^{-2} \%$, вдали от месторождения — лишь $1 \cdot 10^{-3} \%$.

Для анемоны соответствующие цифры для никеля были $3,1 \cdot 10^{-2}$ и $7,8 \cdot 10^{-4} \%$, для кобальта соответственно $1,2 \cdot 10^{-3}$ и $2,6 \cdot 10^{-4} \%$ и для меди $1 \cdot 10^{-2}$ и $1,3 \cdot 10^{-3} \%$.

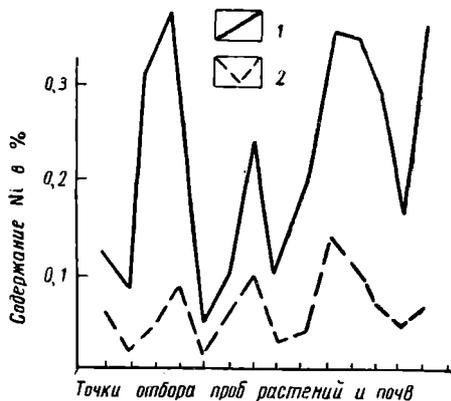


Рис. 27. Корреляция содержаний никеля в золе растений и почвах Чугаевского никелевого месторождения (по А. П. Виноградову и Д. П. Малюге):

1 — содержание никеля в почвах; 2 — содержание никеля в золе растений

гащенным всеми этими элементами, является горизонт А (глубина 0—17 см), где кларки концентрации для никеля, кобальта и меди достигали соответственно 90, 23 и 5; для горизонта В (17—34 см) они составляли 60, 12 и 3 и для горизонта С (34—44 см) — 30, 6 и 2. В результате многочисленных определений указанных элементов в почвах и растениях было доказано, что они ведут себя симбатно, хотя строгой пропорциональности между содержанием элементов в почвах и растениях и не наблюдается (рис. 27).

Интересно отметить, что как для почв, так и для растений, развитых над никелевыми месторождениями, отношение

Таким образом, фактор концентрации элементов в золе растений, произрастающих над месторождениями, составлял для никеля 22—40, для кобальта 5, для меди около 8. Аналогичная картина наблюдалась и для некоторых других изученных автором растений.

Одновременно с изучением золы растений Д. П. Малюга изучал также распределение никеля, кобальта и меди по горизонтам почв, причем показал, что для темно-каштановых почв, развитых над рудным месторождением, наиболее обо-

никеля к кобальту и никеля к меди было сильно повышенным, по сравнению с их отношениями в почвах и тех же растениях на обычных почвах. Так, отношение никеля к кобальту в первом случае составляло 12,5—20 (для почв) и 9—27 (для растений), в то время как для безрудных участков было соответственно 3,5—4,7 (для почв) и 3—6 (для растений). Д. П. Малюгой для отдельных изученных участков Кемпирсайского рудного поля были составлены соответствующие биогеохимические карты, которые достаточно хорошо увязывались с ранее выявленными разведкой рудоносными площадями; для некоторых площадей, считавшихся ранее перспективными, биогеохимические исследования показали низкие содержания никеля, кобальта и меди; последующие буровые работы подтвердили здесь отсутствие промышленного оруденения.

Помимо Кемпирсайского рудного поля Д. П. Малюга проводил аналогичные биогеохимические и почвенные исследования на Викторовском хромитовом месторождении и ряде медных месторождений Южного Урала, на сульфидно-арсенидных, никелевых и кобальтовых месторождениях Тувинской автономной республики, а также на ряде месторождений Восточного Забайкалья и Кавказа. В результате обобщения собственных материалов и данных других исследователей автор пришел к выводу, что биогеохимический метод может применяться при поисках различных рудных месторождений в районах с достаточно мощным покровом рыхлых отложений, в том числе моренных осадков и песков степей и пустынь. Он дает положительные результаты на обширных плато с мощной корой выветривания, в широких долинах, на пологих склонах гор и холмов, покрытых растительностью, т. е. на территориях, где другие геологические и геохимические методы оказываются обычно мало эффективными. Глубинность биогеохимического метода, по данным Д. П. Малюги, составляет 15—20 м, в особо благоприятных условиях она может достигать 50 м.

Автор считает, что практически заслуживающими внимания являются концентрации изученных им элементов в золе растений, превышающие более чем в 10 раз, а в почвах — в десятки раз их содержание в обычных условиях. Наиболее подходящими для целей биогеохимических поисков являются многолетние растения с глубокой корневой системой и интенсивным водообменом. Большое значение для интерпретации аномалий автор придает выяснению отношений концентраций пар родственных элементов в золе растений и в почвах, в

том числе отношении никеля и кобальта для никелевых месторождений.

Большие трудности для поисковых работ представляют, как известно, районы развития моренных ледниковых отложений, перекрывающих коренные породы и месторождения. Поэтому очень интересны сделанные попытки применить в этих районах биогеохимические методы. Имеющийся опыт в этом отношении пока еще невелик, но полученные результаты являются обнадеживающими.

В 1938—1939 гг. в Швеции Палмквист и Брундин обнаружили повышенные концентрации никеля и меди в золе ряда деревьев, произрастающих на моренах над рудными телами. В Финляндии Ранкама в 1939 г. констатировал повышенные концентрации никеля в золе берез и некоторых других растений, растущих на моренах, перекрывающих никелевые месторождения среди серпентинитов. Мощность рыхлых отложений в районе Макола была от 3 до 4 м; верхний слой состоял из торфа и подстилался песком, под ним залегали моренные отложения мощностью от 1,5 до 3 м, представленные валунами гнейсов, гранитов и слюдяных сланцев, принесенных издалека. Содержание никеля в золе растений данного района было невысоким, но все же позволяло фиксировать никелевые руды через ледниковые отложения указанной мощности. В другом районе мощность моренных отложений была меньше, и здесь содержание никеля в золе растений было гораздо более высоким, достигая 0,1—0,5%, т. е. в десятки и сотни раз превышало содержание указанного элемента в тех же растениях, произрастающих вдали от месторождений.

Автор приходит к выводу, что обогащение растений, произрастающих на указанных моренах, перекрывающих рудные тела, объясняется восходящей циркуляцией металлоносных растворов. Этот вывод согласуется с наблюдениями Н. И. Сафронова, установившего в 1935 г. в моренном глинистом материале над сульфидными месторождениями Мончетундры высокие концентрации никеля (сотые доли процента) и меди (до 0,1%). Ранкама считает, что микроэлементы в золе растений могут быть использованы не только для целей геохимических поисков, но также при геологическом картировании; они позволяют отбивать контакты разных пород, скрытых под рыхлыми отложениями, поскольку содержание различных микроэлементов в разных породах сильно варьирует.

В. Мармо в 1953 г. опубликовал результаты своих био-

геохимических исследований, проведенных в разных районах Финляндии на площадях, сложенных сланцами, содержащими сульфиды (пирротин, пирит, халькопирит и сфалерит), и гранитами с минерализацией молибденита и халькопирита. Работы велись с целью изучения взаимоотношений между содержанием меди, цинка, никеля и молибдена в горных породах, грунтовых водах и в золе ряда растений. Автор показал, что воды обследованных колодцев в пределах минерализованных участков значительно обогащены указанными металлами, по сравнению с водами пустых участков; так, на площадях, лишенных минерализации, цинк содержится в водах в количестве менее $5 \cdot 10^{-3}$ г/л, в то время, как на площадях со средним содержанием цинка в 0,1% его количество в водах доходит до $10-20 \cdot 10^{-3}$ г/л. Для меди в водах соответственные значения были: $0,5 \cdot 10^{-3}$ г/л для пустых филлитов и $2 \cdot 10^{-3}$ г/л для сульфидоносных сланцев.

В качестве объектов для биогеохимических исследований были выбраны наиболее распространенные растения — брусника и богульник. Растения отбирались по сетке со стороны около 80 м. На составленных автором планах видно, что никель в золе растений обнаруживается на участках сильных магнитных аномалий и почти отсутствует в растениях, собранных на площадях распространения неминерализованных филлитов. Аналогичные выводы были сделаны для меди и цинка, причем было замечено, что колодезные воды более точно отражают содержание меди во вмещающих породах, чем растения. Мощность моренных отложений на этих площадях составляла около 1—2 м. Площадь, сложенная молибденоносными гранитами, заболочена, причем мощность болотных отложений достигает 3—7 м. Зола листьев и ветвей произрастающего на болоте богульника показала повышенные концентрации молибдена в тех местах, которые давали заметную минерализацию по результатам разведочного бурения — в керне подстилающих гранитов и гранодиоритов. Аналогичные результаты были получены для меди, которая присутствует в небольших количествах в форме вкрапленного халькопирита в указанных коренных породах.

Автор обращает внимание на то обстоятельство, что между содержанием указанных элементов в породах и растениях нет точной пропорциональности; в отношении меди он объясняет это, ссылаясь на установленный ботаниками факт, что ее концентрация в растениях может достигать лишь некоторой предельной для каждого вида величины, в результате чего дальнейшее повышение содержания ее в по-

родах и растворах уже не влечет за собой повышения концентрации металла в растениях.

В. Мармо, оценивая возможность применения биогеохимических методов в условиях Финляндии, приходит к заключению, что они могут оказаться весьма полезными в комплексе с геофизическими методами, особенно для расшифровки электрических или магнитных аномалий. Кроме того, биогеохимические методы могут применяться в тех случаях, когда руды вообще не дают геофизических аномалий или когда последние очень слабые, что, например, имело место для изученной им площади молибденоносных гранитов.

Приведенные примеры применения биогеохимических методов в Скандинавских странах на площадях, перекрытых ледниковыми отложениями, в общем оказались положительными и должны привлечь к себе внимание исследователей, работающих в аналогичных условиях. Указанными, по существу пока опытными, работами доказано, что биогеохимические методы позволяют давать заключения о горных породах и заключенных в них рудах и в том случае, когда они перекрыты моренами мощностью в несколько метров. Связь между элементами коренных пород и растений здесь осуществляется, по-видимому, за счет циркулирующих в моренном материале грунтовых вод. На это указывают, помимо приведенных фактов, также и некоторые другие примеры наличия в моренном материале, в его мелкой глинистой фракции повышенных концентраций ряда рудных элементов — цинка, меди, кобальта, никеля, молибдена и других, если этот моренный материал перекрывает соответствующие минерализованные коренные породы. Так, Г. Т. Макеенко в 1955 г. в Карелии констатировал повышенные концентрации меди, никеля и молибдена в мелкой фракции ледниковых суглинков и супесей мощностью до 3—5 м, перекрывающих коренную минерализацию.

Методику биогеохимических поисков медно-никелевых месторождений, перекрытых ледниковыми отложениями, для условий Карелии и Кольского полуострова разработал В. Д. Полферов¹. В этих районах, по данным автора, при поисках на заболоченных площадях целесообразно проводить опробование торфяного горизонта или растительной подстилки с глубины 0,2—0,3 м от поверхности. Пробы весом 100 г подвергаются озолению, и затем в них спектральным

¹ В. Д. Полферов. Геохимические поиски месторождений медно-никелевых сульфидных руд. Бюл. научн. технич. информации, ВИМС, № 1 (35), М., 1962.

анализом или колориметрически определяются содержания никеля, кобальта и меди. Результаты такого биогеохимического опробования позволяют выявлять вторичные ореолы рассеяния при мощности покровных отложений до 15—20 м.

Н. И. Сафронов, анализируя имеющиеся материалы по поискам в районах развития моренных отложений, пришел к выводу, что геохимические методы в данном случае должны базироваться на изучении: а) природных сорбентов, главным образом глинистых фракций моренного материала, способных концентрировать из растворов рудные элементы; б) грунтовых вод с определением в них искомым металлов и свободной серной кислоты — продукта окисления сульфидных руд; в) растительности, поскольку она в своем составе отражает характер грунтовых вод и природу коренных пород и содержащихся в них руд.

Сравнивая биогеохимические методы с металлометрическими и гидрогеохимическими, необходимо отметить следующие моменты. В то время как механические и водные ореолы, используемые при металлометрии и гидрогеохимии, связаны с соответствующими месторождениями непосредственно, т. е. имеют место простые соотношения типа месторождение → механический ореол, или месторождение → водный ореол, в случае биогеохимических ореолов эта связь становится более сложной и может быть выражена лишь многочисленной формулой типа месторождение → водный ореол → почвы → растения.

Учитывая избирательную способность растений по отношению к разным элементам и ряд других усложняющих картину обстоятельств, следует ожидать, что корреляция между содержанием элементов в растениях и в коренных породах и месторождениях будет в общем виде менее четкой, чем в случае механических и водных ореолов, что, как показывают наблюдения, в действительности обычно и наблюдается. С этой точки зрения биогеохимический метод является менее совершенным, чем металлометрическая съемка и гидрогеохимия. Однако в ряде случаев биогеохимический метод имеет преимущества перед указанными методами. Так, например, в пустынных и степных условиях при отсутствии или крайней ограниченности естественных выходов подземных вод и искусственных колодцев, где, следовательно, гидрогеохимический метод поисков не может применяться, а возможности металлометрии ограничиваются значительной мощностью рыхлых отложений, преимущества биогеохимической съемки, при наличии, конечно, хотя бы редкой растительности, стано-

вятся очевидными. Этому способствует и то важное обстоятельство, что растения, произрастающие в аридных условиях, обычно имеют очень глубокую корневую систему; так у саксаула — типичного представителя наших среднеазиатских пустынь — корни проникают на глубину 10 м и более, что, конечно, недоступно для обычной металлометрии.

Геоботанический метод

Этот метод основан на использовании составляющих растительный покров сообществ и отдельных видов растений, а также их форм в качестве индикаторов как повышенных, так и пониженных концентраций химических элементов в почвах, породах, месторождениях и грунтовых водах. На существование связи между растительным покровом и геологическими и гидрогеологическими условиями обращали внимание уже давно. Еще Витрувий, знаменитый римский архитектор и инженер, живший в I веке до нашей эры, говоря о способах отыскания воды, приводил перечень растений, которые указывают на ее близость. У М. В. Ломоносова встречаются высказывания о растениях как о поисковых признаках на рудные месторождения.

А. М. Карпинский в 1841 г. посвятил этому вопросу специальную работу под названием «Могут ли живые растения быть указателями горных пород и формаций, на которых они встречаются?», в которой доказывал, что наблюдения над совокупностью всех видов растений, населяющих данную местность, могут дать правильные представления о почвах и грунтах этой местности. П. А. Ососков широко использовал геоботанические наблюдения в практике геологосъемочных работ, производимых им в конце прошлого и начале настоящего столетия в Поволжье. В то же время Н. К. Высоцкий широко применял указанный метод в своих геологических исследованиях на Северном Урале, обратив внимание на приуроченность различных деревьев к различным породам — габбро, диоритам, перидотитам и др. Серьезное значение придают геоботаническому методу гидрогеологи; так, В. А. Приклонский показал, что геоботанические наблюдения весьма помогают при гидрогеологических исследованиях, удешевляют поиски подземных вод, позволяют делать прогнозы о присутствии воды и более рационально задавать буровые скважины на воду.

Широко используются у нас начиная с 1945 г. геоботанические методы при производстве аэрогеологических работ:

в состав геологических экспедиций при производстве этих работ включаются геоботанические отряды. Итогом проводимых в этом направлении исследований явился опубликованный в 1955 г. специальный сборник под названием «Геоботанические методы при геологических исследованиях», в котором нашли отражение проведенные исследования по применению указанного метода для расчленения литологически сходных толщ, составления литологических карт обнаружения тектонических нарушений, изучения битуминозности пород при гидрогеологических работах, поисках соляно-купольных структур, поисках рудных месторождений и месторождений бора и т. д.

Давно известны факты предпочтительного развития отдельных видов растений на почвах, обогащенных теми или иными химическими элементами, таковы цинковая, литиевая, медная, никелевая, галофильная и другие флоры. Особенно давно и широко известна цинковая флора; галмейная фиалка, галмейная ярутка, один из видов анютиных глазок и другие виды цинкофилов хорошо развиваются на почвах, обогащенных цинком. Примерами никелевой флоры, произрастающей по преимуществу на серпентинитах, могут служить некоторые виды папоротников и гвоздик. Известно несколько видов медной флоры, в том числе качим и некоторые мхи; для почв, обогащенных марганцем, характерны наперстянка, чилим и фукус; для засоленных почв — солянка; для почв, обогащенных оловом, — седмичник и т. д. Указанные растения, произрастающие на почвах, обогащенных теми или иными химическими элементами, сами значительно обогащаются этими элементами, что и используется широко при собственно геохимическом зольном методе поисков, рассмотренном нами ранее.

В то время как некоторые виды растений охотно поселяются и хорошо развиваются на почвах с аномально высокими концентрациями определенных элементов, другие растения реагируют на эти концентрации болезненно или вообще избегают таких почв. Некоторые почвы, особенно богатые вредными для растений элементами, вообще становятся непригодными для них и в результате такие участки оказываются пустыми, не заселенными. Это иногда наблюдается над колчеданными месторождениями, на участках, сильно обогащенных бором, на сильно засоленных почвах и т. д. Так, в Трансваале платиновые месторождения выделяются почти полным отсутствием растительности, что объясняется исключительной бедностью почв, развивающихся над перидо-

титам, необходимыми для растений питательными веществами. То же самое наблюдается над алмазоносными кимберлитами. Указанное обстоятельство используется при поисках платины и алмазов.

Растения очень тонко реагируют на концентрации некоторых элементов, в результате чего при особо повышенных концентрациях этих элементов в почвах у растений наблюдаются те или иные морфологические изменения: меняется окраска цветов и их форма, цвет листьев и т. д. Так, при избытке марганца окраска цветов астры и гвоздики становится более интенсивной, венчики миндаля меняют свою окраску с белой на розовую; при избытке бора у некоторых растений листья становятся темно-зелеными; избыток меди вызывает осветление листьев и т. д. Н. А. Базилевская экспериментально доказала, что у эмольдии калифорнийской цветы в присутствии солей меди сизые, а при наличии цинка — лимонно-желтые. С. В. Викторов наблюдал яркую желто-зеленую окраску листьев у полыни при обогащении почв железом в Южной Фергане. Значительные изменения окраски растений наблюдаются при повышенных содержаниях урана. На почвах, обогащенных ураном и торием, наблюдаются также глубокие изменения в строении и облике растений и отдельных их частей. Эти изменения связаны с возрастанием количества полиплоидных форм растений, характеризующихся увеличенным набором хромосом в ядерном аппарате растений. В результате образуются ненормально развитые гипертрофированные формы с нарушенными пропорциями органов (гигантские или карликовые формы).

Подобные патологические отклонения от нормы наблюдаются и в случае повышенных концентраций в почве и некоторых других химических элементов. Так, например, А. М. Швыряева своими работами доказала, что некоторые растения, произрастающие над борными месторождениями (ашаритовые и улеситовые руды), не только сильно обогащаются бором, но и обнаруживают значительные патологические аномалии, по сравнению с растениями, живущими на обычных почвах.

Имеется ряд указаний на то, что битуминозные вещества также приводят к изменениям во внешнем облике растений. Известно, например, что при применении в качестве удобрений бурых углей, гумбина и других природных веществ, богатых битумами, сильно возрастают урожаи ряда культурных растений, причем это происходит за счет увеличения их размеров. Были отмечены также случаи появления на битум-

минозных выбросах грязевых вулканов особых форм растений, являющихся результатом приспособления растений к условиям вулканической грязи; среди этих растений — особые виды полыни, первоцвета, солянки и другие, встречающиеся только на грязевых выбросах. С. В. Викторов и другие геоботаники установили, что для битуминозных грунтов характерно появление своеобразных форм растений, отличающихся гигантизмом (т. е. размерами, значительно превышающими среднюю величину данного вида) и уродливостью, выражающейся в нарушении нормальных пропорций органов растения и в изменении его внешнего облика. Этими же исследованиями было также установлено, что многие растения, живущие на битуминозных грунтах, часто обнаруживают способность ко вторичному цветению, сюда относятся некоторые злаки, сложноцветные, ирисовые, розоцветные и др. Причины всех этих явлений пока не вполне ясны, так как действие битумов на растения изучено пока очень слабо; однако особенности растений, произрастающих на почвах, обогащенных битумами, настолько характерны, что позволяют очень легко опознавать присутствие битумов в грунтах в пределах проникновения корневых систем этих растений. Это может быть использовано при поисках месторождений нефти и горючих газов.

Специфические внешние изменения в растениях, вызываемые действием того или иного химического элемента и выражающиеся в появлении у растений различных уродливостей, в ботанике называются тератологическими. Поэтому геоботанические исследования, учитывающие указанные изменения, С. В. Викторов предлагает называть тератологическими. Метод, основанный на изучении видов растений, которые более или менее постоянно связаны с концентрациями определенных элементов и потому являются их показателями, С. В. Викторов называет методом прямых индикаторов. Методом косвенных индикаторов он соответственно предлагает называть изучение растительных сообществ, связанных с рудоносными породами и геологическими свитами.

В основе геоботанического метода лежит представление о тесной связи и взаимозависимости различных природных процессов, связывающих в единое целое разрушающиеся горные породы, образующиеся на них почвы и произрастающие на последних растения. Научные основы этого учения были заложены выдающимися исследованиями и обобщениями В. В. Докучаева и его учеников, особенно В. И. Вернад-

ским, Б. Б. Польшовым и А. П. Виноградовым, развившими и конкретизировавшими представления В. В. Докучаева о взаимосвязи между почвами и растениями, создавшими биогеохимию, учение о биогеохимических провинциях и геохимических ландшафтах.

Понятие о геохимических ландшафтах было сформулировано Б. Б. Польшовым в 1946 г. и в последующие годы в ряде его работ. Под элементарным геохимическим ландшафтом Б. Б. Польшов понимал «один определенный элемент рельефа, сложенный одной породой или наносом и покрытый в каждый момент своего существования определенным растительным сообществом. Все эти условия создают определенную разность почвы и свидетельствуют об одинаковом на протяжении элементарного ландшафта развитии взаимодействия между горными породами и организмами». Б. Б. Польшов указывал, что «рассуждая теоретически, пространство, сложенное однородной почвой, должно соответствовать определенному составу растительного сообщества, однородному составу почвообразующей породы или наноса, однородному составу и состоянию приземного слоя тропосферы и одному определенному не только климату, но и микроклимату»¹. Дальнейшее развитие идей Б. Б. Польшова мы находим в работах А. И. Перельмана, особенно в его книге «Геохимия ландшафта».

Растительный покров, с точки зрения их представлений, может рассматриваться как индикатор геохимических процессов, протекающих в данном ландшафте, как показатель химизма самих коренных пород и развивающихся над ними почв, а следовательно, и как индикатор геологических и гидрогеологических условий местности. Геохимия ландшафта приобретает, таким образом, важное значение в качестве одной из теоретических основ геохимических и особенно геоботанических методов поисков; она позволяет, как уже говорилось ранее, районировать территории по условиям ведения геохимических поисков.

¹ Б. Б. Польшов. Учение о ландшафтах. Избранные труды. Изд-во АН СССР, М., 1956.

Глава 8. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

При поисках полезных ископаемых приходится применять в зависимости от обстоятельств разные геохимические методы. Примером является нефть, для поисков которой применяются разнообразные геохимические методы, основанные на использовании тех или иных индикаторов. Помимо углеводородных газов, рассмотренных выше, имеются и другие геохимические индикаторы нефтеносности. Они могут быть как прямыми, так и косвенными. К прямым индикаторам помимо метана и тяжелых углеводородных газов относятся также битуминозные продукты изменения нефтей и газов, следы жидкой нефти в горных породах, а также продукты окисления нефти, фенолы и другие соединения, растворенные в водах, прилегающих к нефтегазовым залежам. Косвенные показатели нефтегазонасности еще более разнообразны; они являются результатом воздействия нефти и горючих газов на окружающие породы, воды и микроорганизмы. Сюда относятся: сероводород, углекислота, бикарбонат натрия, иод, бром и аммоний в водах, связанных с нефтяными и газовыми залежами, отсутствие в этих водах свободного кислорода и сульфат-иона, низкий окислительно-восстановительный потенциал, своеобразие микрофлоры. В окружающих нефтяные залежи породах вследствие восстановительной обстановки характерно отсутствие соединений окисного железа и наличие соединений закисного (сульфиды, карбонаты). На пути следования углеводородных газов развиваются своеобразные микроорганизмы, очень чутко реагирующие на состав этих газов и являющиеся поэтому иногда очень хорошим поисковым признаком нефтяных и газовых залежей.

В связи с перечисленными прямыми и косвенными показателями нефтегазоносности выделяют следующие разновидности геохимических методов поисков нефти и газа: 1) газовые, 2) битумные, 3) гидрохимические, 4) почвенно-солевые, 5) микробиологические, 6) радиометрические. Первые два метода являются прямыми, последние четыре — косвенными, в соответствии с характером индикаторов, которые положены в основу методов. Методы битумные и почвенно-солевые основаны на изучении особенностей горных пород и почв, индикаторами нефтегазоносности здесь являются твердые тела. Поэтому их можно объединить в группу литохимических методов. Таким образом, мы видим, что для поисков месторождений нефти и газа применяются все четыре типа геохимических методов: атмосферические (газовые), литохимические, гидрохимические и биогеохимические — в специфических модификациях, в соответствии с особенностями полезных ископаемых. Методы газовой съемки мы рассмотрели раньше, теперь рассмотрим остальные упомянутые методы.

Битумные методы

Битумные методы поисков и разведки нефтяных месторождений основаны на выявлении в породах и почвах нефтяных битумов, т. е. твердых продуктов превращения нефти. Под «битумами» в настоящее время принято понимать природные органические вещества, растворяющиеся в нейтральных органических жидкостях (бензоле, хлороформе, ацетоне, сероуглероде и т. д.) при нормальных условиях температуры и давления¹. При таком определении в понятие «битум» входят не только вещества нефтяного происхождения, но и не нефтяного. С другой стороны, не все продукты изменения нефтей относятся к битумам; некоторая небольшая их часть является нерастворимой. Нефтяные битумы, как правило, образуют самостоятельные скопления органических веществ в неорганической среде, таковы, например, асфальты, озокериты, керы и др. Если среди них и присутствуют другие органические вещества, нерастворимые в нейтральных органических жидкостях, то количество их обычно бывает весьма незначительно. В этом отношении нефтяные битумы существенно отличаются от всех других битумов (битумов почв, растений, торфов, сапропелей, бурых углей, горючих сланцев, каменных углей и т. д.), все эти битумы никогда не дают

¹ См. А. А. Карцев и др. Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений.

самостоятельных минералов, а являются лишь второстепенными фракциями скоплений соответствующих органических веществ.

Эти рассеянные в осадочных горных породах битумы обычно являются сингенетичными с этими породами; что касается нефтяных битумов, то они всегда, по-видимому, являются вторичными, эпигенетичными; все это объясняется происхождением тех и других битумов. Нефтяные битумы отличаются от других битумов также в химическом отношении: они содержат несколько больше углерода и водорода, но меньше кислорода, серы и азота. С точки зрения геохимических методов поисков большой интерес представляют битумы, рассеянные в осадочных породах — глинах, сланцах, песчаниках, известняках и т. д. Исследования В. А. Успенского и других ученых показали, что битумы в этих породах составляют лишь незначительную часть всего органического вещества, содержащегося в них.

Так, в глинах и глинистых сланцах битумы составляют около 3% от органического вещества, в мергелях — 2,7%, в песчаниках и алевролитах — 4,1%, в известняках и доломитах — 6,1%. Средние содержания органического вещества в указанных породах составляют соответственно: 3,3, 2,9, 1,7 и 0,55%, т. е. максимальным было содержание в глинах и глинистых сланцах, а минимальным — в известняках и доломитах.

Нефтяные битумы в породах могут находиться над нефтяными залежами, являясь результатом перемещения самой нефти, которая потом превратилась в битумы, или продуктами полимеризации углеводородных газов, мигрировавших из нефтяной залежи. Концентрация битумов в данном случае может быть довольно высокой, значительно превосходя содержание битумов в таких же породах, но находящихся вне влияния нефтяных залежей. Это обстоятельство и является основой битумных методов поисков месторождений нефти и горючих газов.

Помимо прямого обнаружения нефтяных и газовых залежей, битумная съемка позволяет выявлять нефтеносные свиты, к которым приурочены залежи; это особенно важно в новых районах при рекогносцировочных исследованиях. Поэтому и на практике различают эти два вида поисков: битумные поиски нефтеносных свит и поиски нефтяных залежей.

Поиски нефтеносных свит проводятся в областях, нефтеносность которых еще не выявлена, или же в областях, где

нефтеносность известна для отдельных частей разреза, но не выявлена для других, например для глубоко залегающих свит. В первом случае обычно проводят маршрутные битумные съемки, а также ведут визуальные поиски нефтяных каустобиолитов; во втором случае необходимо изучать битуминозность кернов, имеющихся в районе буровых скважин. В том и другом случае в результате соответствующих исследований устанавливается наличие нефтяных системов в определенной свите пород; если удастся путем систематических наблюдений установить стратиграфическую приуроченность этих битумов, вопрос о нефтеносной свите решается положительно. Это имеет важнейшее значение при прогнозах нефтеносности и газоносности и проведении поисковых и разведочных работ.

Нефтеносные свиты, относительно обогащенные рассеянными нефтяными битумами, могут и не содержать промышленных скоплений нефти, для этого необходим ряд дополнительных условий, главным образом наличие соответствующих структур, способных концентрировать рассеянную нефть. С другой стороны, и выявленное путем опробования отсутствие нефтяных битумов в данной свите еще не дает достаточных оснований для того, чтобы считать эту свиту явно не перспективной на нефть или горючие газы; этот результат может оказаться следствием недостаточной детальности исследований или может объясняться рядом причин, в силу которых произошло разрушение битумов.

Поиски нефтяных и газовых залежей проводятся путем площадной битумной съемки на данном участке; она заключается в изучении распределения и характера битумов в почвах, наносах или коренных породах с целью выявления битумных аномалий, генетически связанных с залежами нефти или горючих газов. Битумные аномалии могут образовываться двумя способами: а) путем полимеризации углеводородных газов, мигрирующих из залежей к поверхности Земли, что сейчас может считаться твердо установленным и б) в результате аналогичной диффузии и фильтрации нефти. Просачивание нефти через глинистые породы идет крайне медленно, во много раз медленнее, чем просачивание газов и поэтому для глубоко залегающих нефтяных залежей возможно не имеет практического значения. Что касается фильтрации нефти через трещины пород, то это явление весьма часто наблюдается в природе в макроскопических масштабах; есть основания считать, что нефть может передвигаться и по субмикроскопическим трещинкам, являясь потом мате-

риалом для рассеянной битумной микроминерализации. Но этот процесс, по-видимому, также не имеет широкого развития, уступая миграции газов.

Таким образом, можно предполагать, что при битумной съемке поверхностных отложений мы в большинстве случаев имеем дело с битумами, образовавшимися из углеводородных газов. При почвенной битумной съемке отбираются образцы почв по определенной сетке с глубины от 20 до 200 см в зависимости от типа почв; в этих образцах затем определяют количество битумов, общий органический углерод и углерод битумов. Повышенное содержание битумов, превышающее в несколько раз натуральный фон для этих почв, обычно уже является показателем нефтеносности и при наличии благоприятных геологических структур является основанием для поискового бурения. Еще более надежным показателем нефтеносности является содержание битумов, отнесенное не ко всей почве, а лишь к ее органической части. Этот показатель выражают в виде отношения:

$$\frac{C_{\text{бит}}}{C_{\text{орг}}} .$$

В почвенном гумусе содержание битума обычно меньше 10%, в случае нефтяной или газовой залежи на глубине это отношение заметно возрастает. Так, по данным М. М. Кононовой, полученным для Поволжья, Закавказья и других провинций, указанное отношение для нефтеносных площадей составляло 12—62%, а за их пределами — лишь 4—10%. Рассмотрение построенных автором профилей ясно показывает, что содержание $C_{\text{орг}}$ с глубиной быстро падает, а содержание $C_{\text{бит}}$ в пробах, взятых над нефтяными залежами, с глубиной возрастает. Исходя из этого рационально отбирать пробы по возможности с большей глубины, тогда влияние почвенного гумуса и содержащихся в нем битумов будет ослаблено, а роль нефтяных или газовых битумов будет более четкой.

М. И. Суббота показал, что содержание битумов в почве и подпочве зависит от атмосферных осадков, которые частично переносят битумы в более глубокие слои.

В последние годы при производстве битумных съемок широкое применение получил люминесцентный анализ, основанный на способности битумов люминесцировать под воздействием ультрафиолетовых лучей. Люминесцентный анализ позволяет весьма просто и быстро обнаруживать и определять

содержание битумов в почвах, породах, водах и других природных объектах, притом в количествах, недоступных для других методов анализа, что часто имеет место при особо большом рассеянии битумов в породах.

Разработкой и внедрением люминесцентного метода в практику поисков нефти у нас стали заниматься с 1939 г., когда Н. А. Шлезингер в г. Саратове впервые предложил этот метод. Особенно много в этом отношении сделала В. Н. Флоровская, которая провела в этом направлении большие исследования и опубликовала ряд работ, в том числе совместно с В. Г. Мелковым известную монографию «Введение в люминесцентную битуминологию». Согласно исследованиям В. Н. Флоровской, содержание битумов на изученных объектах в аномалийных зонах (в связи с нефтяными месторождениями) значительно выше, чем за их пределами, причем над месторождениями, приуроченными к геосинклинальным условиям, содержание эпигенетических битуминозных веществ достигает десятых долей процента, в то время как над месторождениями, приуроченными к платформам, оно не превышает нескольких тысячных долей процента, что мы можем объяснить различной легкостью миграции углеводородных газов в условиях геосинклиналей и платформ.

Данные В. Н. Флоровской приведены в табл. 14.

Таблица 14

Содержание битумов

Геотектонические области	Район исследования	Содержание битума (%)	
		в аномалийной зоне (средн.)	вне аномалийной зоны
Геосинклиналь	Краснодарский край Апшеронский полуостров	0,397	0—0,002
		0,45	0,001—0,01
Платформа	Южно-Куйбышевское Заволжье	0,0017	0,00027—0,003
	Самарская Лука	0,0045	0,0003 —0,0034
	Кинель-Черкасский район	0,0013	меньше 0,00015
	Саратовская область	0,0026	0,00013—0,0013

В докладе В. Н. Флоровской на Совещании по геохимическим методам поисков нефтяных и газовых месторожде-

ний¹ помимо указанных выше данных были приведены результаты конкретных поисковых работ на нефть с применением люминесцентно-битумного метода. Так, на Ново-Дмитриевской структуре Краснодарского края в 1948—1949 гг. были изучены керны, отобранные из неглубоких (до 3 м) газосъемочных скважин, пробуренных по профилям. Эти работы проводились до открытия промышленной нефтеносности и позволили выделить шесть битумных аномалий, среди них большую, приуроченную к Ново-Дмитриевскому поднятию. Содержание битума в пределах этой аномалии достигало $n \cdot 10^2$ — $n \cdot 10^{-3}$ %, в то время как средний фон битуминозности в четвертичных отложениях не превышал $n \cdot 10^{-4}$ %. После геологической интерпретации результатов люминесцентно-битумных исследований указанная площадь была рекомендована как перспективная на нефть и газ, что впоследствии и было подтверждено бурением в центре битумной аномалии. Важно отметить, что залежь нефти оказалась на глубине 2214 м в терригенных отложениях третичного возраста; это указывает на большую «глубинность» битуминологического метода и в то же время доказывает, что миграция газов из нефтяной залежи имела действительно большой размах. На Серафимовском месторождении (в Башкирии) для выявления битумной аномалии были проведены четыре профиля вкрест простирания структуры, в пределах которых бурились скважины глубиной до 20 м и выборочно до 50 м. Люминесцентно-битумные исследования образцов керна выявили их повышенную насыщенность битумами, наиболее четко проявленную в нижних частях разреза. Содержание битумов в пределах аномалийной зоны колебалось от 0,0013 до 0,08 %, в то время как за ее пределами не превышало 0,0003 %. Битумная аномалия была выявлена вблизи поверхности в четвертичных отложениях; залежь нефти в данном случае располагалась на глубине свыше 1200 м в песчаниках каменноугольного и верхнедевонского возраста.

Битумные аномалии были выявлены над многими нефтяными месторождениями в разных районах, причем они, как правило, довольно близко совпадали с газовыми аномалиями. Это указывает на то, что часть углеводородов, мигрирующих от залежи, достигает земной поверхности и становится доступной для газовой съемки, другая же часть газов по пути преобразуется в рассеянное битуминозное вещество, выявляе-

¹ В. Н. Флоровская. Люминесцентно-битуминологический метод поисков нефти. Тр. Совещания по геохимическим методам поисков нефтяных и газовых месторождений, 1959.

мое методами люминесцентно-битумной съемки. Конечно, наблюдаются случаи, когда все газы превращаются в битумы; подобными примерами являются упомянутые выше Ново-Дмитриевское и Серафимовское месторождения.

Почвенно-геохимические методы

Залежи нефти и газа посредством газообразных продуктов, выделяемых ими, а также посредством нефтеносных вод, поднимающихся при благоприятных условиях к поверхности Земли, должны оказывать химическое воздействие на почвы, залегающие над этими залежами. Отсюда возникла идея — использовать особенности химического состава почв для поисков месторождений нефти и газа. Эти исследования были начаты в СССР и проводились в основном под руководством В. А. Ковды¹. Они действительно подтвердили высказанные предположения и позволили из большого числа возможных показателей выделить некоторые, наиболее важные. Такими показателями авторы считают в первую очередь содержание нафтеновых кислот в почвогрунтах и состав органического вещества.

Нафтеновые кислоты являются прямым показателем нефтеносности, так как источником их в почвах и грунтах может быть только нефть. Другим также прямым показателем нефтеносности являются битумы нефтяного происхождения, о чем подробно говорилось раньше. В почвенных и подпочвенных водах над нефтяными месторождениями наблюдается увеличение в несколько раз отношения $Cl : SO_4$, вызванное низким содержанием сульфат-иона, а также значительное возрастание содержания иода. Наблюдаются и некоторые другие изменения химического состава почв и почвенно-грунтовых вод в пределах ореола рассеяния нефтяной залежи. С другой стороны, было показано, что формы проявления ореола рассеяния определяются не только геологическими, но также и почвенными условиями.

Почвенно-геохимические аномалии особенно интенсивно проявляются в том случае, когда имеет место интенсивная миграция газов и растворов с глубины к дневной поверхности, обусловленная наличием благоприятных структур (разломы, трещины) и повышенным пластовым давлением. Бла-

¹ В. А. Ковда, П. С. Славин. Почвенно-геохимические аномалии в районах нефтяных месторождений. В сб.: «Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений».

гоприятны для проявления указанных аномалий также сухой жаркий климат, пониженное положение территории и застойный режим грунтовых вод; все это благоприятствует накоплению в почвах мигрировавших из нефтяных залежей веществ.

Почвенно-геохимические исследования должны быть теснейшим образом увязаны с другими геохимическими исследованиями — битуминологическими, гидрохимическими, газовыми и т. д.; все они должны дополнять друг друга.

Гидрогеохимические методы

Эти методы основаны на изучении состава подземных вод, который претерпевает существенные изменения в случае, если эти воды находились в контакте с нефтяной залежью. Изучение особенностей нефтеносных вод началось еще в прошлом столетии; уже тогда А. Потылицын установил, что характерной особенностью этих вод является их бессульфатность. Несколько позднее, в начале нашего столетия, К. В. Харичков изучил в этих водах битуминозные вещества. В тридцатых годах В. А. Сулин, Л. А. Гуляева и другие разработали общие принципы учения о гидрохимических показателях нефтеносности, которые затем были уточнены и расширены.

Гидрогеохимические показатели нефтеносности разделяются, подобно другим показателям, на прямые и косвенные.

К прямым показателям относятся растворимые в водах вещества, которые попадают в воду непосредственно из самой нефти. Такими веществами являются: а) растворенные в воде битумы, б) фенолы и их производные, в) иод, г) аммоний.

Растворенные в водах битумы представлены солями органических кислот (мылами), главным образом нафтеновых. В природные воды они поступают только из нефтяных залежей, что делает битумы весьма ценным прямым поисковым критерием: наличие их в водах является прямым показателем нефтеносности. Однако по концентрации битумов в природных водах еще нельзя говорить о масштабах нефтеносных залежей: иногда высокие концентрации битумов свидетельствуют о разрушении нефтяных залежей путем окисления. Отсутствие битумов в водах не является окончательным доказательством отсутствия нефтяных залежей, так как для образования битумов требуются некоторые дополнительные условия (наличие нафтеновых кислот в нефтях, специфический характер самой воды и т. д.).

Фенолы и их производные в водах нефтеносных районов были обнаружены недавно и еще мало изучены. По мнению ряда ученых, они могут служить достаточно надежными показателями нефтеносности, так как подобно нефтяным битумам могут попадать в воды лишь из нефтяных залежей. На них пока не обращали должного внимания потому, что содержания их в водах и нефти значительно меньше, чем содержания солей нафтеновых кислот. Фенолы присутствуют в водах как в свободном состоянии, так и в виде солей с металлами — фенолятов; те и другие хорошо растворимы в воде. Вопрос о практическом использовании этих соединений при поисках месторождений нефти пока не ясен, хотя теоретические предпосылки для этого имеются.

Иод в природных водах уже давно рассматривается как важный показатель нефтеносности, хотя он может попадать в воды и не только из нефтей. В данном случае, в отличие от битумов, большое значение имеет концентрация иода: в нефтеносных водах его содержание в тысячи раз превосходит содержание в обычных водах; так, в морской воде концентрация иода составляет $5 \cdot 10^{-2}$ мг/л, в пресных водах земной поверхности и грунтов лежит в пределах 10^{-5} — 10^{-3} мг/л, в подземных рассолах вод поднимается до десятых долей миллиграмма на литр, в то время как в водах нефтеносных отложений часто достигает десятков миллиграмма на литр, а в исключительных случаях даже превышает 100 мг/л. Таковы, например, нефтяные воды Чусовского района на Урале.

Большая часть иода, присутствующего в водах нефтеносных отложений, заимствована из нефти, куда он поступал, вероятно, из водорослей — концентратов иода. Обогащению нефтей иодом способствует и то обстоятельство, что нефтяные залежи обычно приурочены к закрытым геологическим структурам, что препятствует улетучиванию иода. Разной степенью закрытости структуры можно частично объяснить и наблюдаемые различия в содержании иода в разных нефтеносных районах. Считают, что содержание иода в воде, превышающее 5 мг/л, уже заслуживает внимания с точки зрения возможной нефтеносности; если минерализация воды небольшая — тогда заслуживают внимания и более низкие значения около 1 мг/л.

Аммоний в водах нефтеносных отложений также присутствует в повышенных количествах, будучи связан в своей главной массе, по-видимому, с органическим веществом нефтей. Содержание аммония в обычных поверхностных и грун-

товых водах всегда небольшое — доли миллиграмма и редко 1—2 мг/л; он попадает в эти воды в результате биохимических реакций, протекающих в почве, и при искусственном загрязнении вод. В глубинных водах не нефтеносных районов аммоний также присутствует, поступая сверху или же являясь продуктом разложения рассеянного органического вещества, присутствующего в осадочных породах. Сохранению аммония в водах, подобно иоду, благоприятствует закрытость геологических структур и восстановительная среда. В водах нефтеносных районов содержание аммония часто поднимается выше 100 мг/л; так, в районе месторождений Второго Баку оно иногда достигает 500 мг/л. Вне нефтяных месторождений такие концентрации аммония в водах никогда не наблюдаются. Поэтому высокие концентрации аммония в водах порядка 100 мг/л и выше являются признаками нефтеносности; иногда этот предел снижается в зависимости от ряда дополнительных условий.

Косвенными гидрохимическими показателями нефтеносности считают те свойства природных вод, которые хотя и не определяются влиянием нефти, подобно перечисленным выше прямым показателям, но связаны с условиями, которые благоприятны для существования нефтяных залежей или являются результатом взаимодействия нефтей и окружающей среды. Сюда можно отнести хлорид кальция и бром¹, обычно сопутствующие нефтяным залежам, хотя в своем генезисе и независимые от нефти, а также часто сульфидные соединения металлов, сероводород и соду.

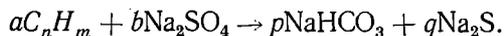
Наиболее важными из этих косвенных показателей являются гидросульфиды и сероводород, присутствующие в водах при условии восстановительной обстановки, наблюдающейся вблизи нефтеносных месторождений. Гидросульфид, сероводород и другие восстановительные формы серы образуются в водах за счет восстановления сульфатов, осуществляемого органическим веществом (в том числе нефтяного происхождения) при участии микроорганизмов. Следствием указанных реакций восстановления является отсутствие в нефтяных водах сульфат-иона, поэтому уже очень давно бессульфатность вод рассматривается как один из важных косвенных показателей нефтеносности. Правда, бывают случаи, когда в подобных водах присутствуют сульфаты; это иногда объясняется обилием сульфатов (гипса, ангидрита и др.) во

¹ В отдельных случаях повышенное содержание брома, возможно, генетически связано с нефтями.

вмещающих нефтяные месторождения породах, иногда же связано с высокими температурами подземных вод (выше 70°), что препятствует биохимическому восстановлению сульфатов.

С другой стороны, отсутствие сульфат-иона в водах еще не является окончательным доказательством наличия залежей нефти: процессы восстановления сульфатов в сульфиды, как известно, могут протекать при участии микроорганизмов при наличии органического вещества и не нефтяного происхождения (например, в восстановительной обстановке на дне водоемов — морей, озер, болот, в каменноугольных месторождениях и т. д., на это указывают, в частности, образующиеся в указанных условиях сульфиды железа). Кроме того, гидротермальные месторождения сульфидных руд, а также сульфидные месторождения других глубинных типов указывают на то, что сульфидные формы серы являются также обычными компонентами глубинных процессов, конечно ничем не связанными с нефтяными залежами. Но если исключить указанные области магматогенных явлений и поверхностных биохимических процессов образования сульфидов, мы приходим к выводу, что повышенные концентрации в водах восстановленных форм серы, или, что то же самое, отсутствие в них сульфатов, являются обычно указанием на наличие нефти или горючих газов.

В результате взаимодействия сульфатов с углеводородами при участии микроорганизмов одновременно с образованием сульфидов происходит образование соды по схеме:



На основании этого щелочные воды гидрокарбонатно-натриевого типа иногда можно рассматривать как косвенный признак нефтеносности.

Однако этот признак нельзя считать особенно надежным, так как содовые воды могут в природе образовываться и некоторыми другими путями, никак не связанными с нефтеносностью, в том числе при процессах выветривания пород, обогащенных натрием, при образовании солонцов, при действии углекислого газа вулканического происхождения на горные породы и т. д. Отличить содовые воды, образовавшиеся тем или иным путем, можно по условиям их залегания (например, содовые воды солонцов могут быть только приповерхностными, воды, связанные с вулканической деятельностью, развиты, естественно, лишь в районах вулканиз-

ма и т. д.) или же по степени их минерализации (она значительно больше у нефтеносных вод, чем у поверхностных и т. д.).

К косвенным показателям нефтеносности относят также хлорид кальция и бром: тот и другой, по мнению некоторых авторов, указывает на далеко зашедшую метаморфизацию солевого состава вод. Этот процесс метаморфизации заходит тем дальше, чем более закрытой является структура, чем более застойна обстановка. Но эта же закрытость структур является благоприятной и для сохранения залежей нефти. Следовательно, повышенные количества хлорида кальция и брома в подземных водах не указывают непосредственно на присутствие нефтяных залежей, а лишь указывают на благоприятную для сохранения нефти гидрогеологическую обстановку.

Интересна величина отношения Cl/Br в различных водах: в морях и океанах она составляет 292, в метаморфизованных водах значительно уменьшается в результате относительной концентрации брома, причем тем больше, чем дальше зашел метаморфизм. Очевидно, что это отношение и для нефтяных вод будет в общем случае не высоким, в соответствии с большой концентрацией брома в этих водах.

Из всего сказанного о прямых и косвенных гидрогеохимических показателях нефтеносности вытекает, что для правильной оценки перспективности района необходимо рассматривать все их комплексно.

Прямые показатели (битумы, фенолы, иод и т. д.) указывают на нефтеносность, но ничего не говорят об условиях сохранения нефти, что очень важно для промышленной оценки ее залежей. В этом случае следует обратиться к тем косвенным показателям нефтеносности, которые характеризуют степень закрытости геологических структур — хлориду кальция, бромю и другим; высокие их концентрации в водах следует рассматривать как благоприятные признаки нефтеносности.

Совершенно очевидно, что оценка гидрогеохимических показателей нефтеносности должна производиться с учетом гидрогеологических данных — условий залегания и движения подземных вод. Если воды постоянно залегают в данном резервуаре, а не пришли извне, тогда заключение о нефтеносности делается на основании гидрогеохимических показателей, характеризующих данный резервуар. Если же воды поступают в данный резервуар извне, их характеристика будет отвечать не данному резервуару, а какому-то другому,

откуда пришли эти воды; здесь заключение о возможной нефтеносности является более сложным, так как определить места нахождения нефтяных залежей без серьезных гидрогеологических и буровых работ трудно.

Если в подземных водах встречаются прямые гидрогеохимические индикаторы нефтеносности и если известно направление движения этих вод, тогда, очевидно, нефтяная залежь будет расположена вверх по течению подземного потока.

Гидрогеохимические поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений проводятся, как и поиски других полезных ископаемых, путем исследований разных масштабов, в связи с чем различают: а) маршрутные съемки, б) съемки с поисковыми целями, в) съемки с разведочными целями.

Маршрутные съемки проводятся при рекогносцировочном обследовании территорий, нефтеносность которых еще не ясна; они имеют целью выявить признаки нефтеносности и дать прогноз о возможной нефтеносности этой территории. При этом изучаются в первую очередь воды тех отложений, которые наиболее вероятно нефтеносны. Пробы отбираются из имеющихся водоисточников обычно по долинам рек или по другим направлениям, где возможно отобрать максимальное число проб.

Одновременно для определения стратиграфического положения вод производят замер температуры источников и делают описание условий их выхода на поверхность. Анализы вод на необходимые компоненты при маршрутных гидрогеологических исследованиях обычно производят в полевых лабораториях. Результаты наносят на гидрохимические карты, основой для них обычно являются имеющиеся геологические карты, на которые особыми значками и цифрами наносят необходимые для прогноза нефтеносности данные: минерализацию вод, содержание в них битумов, фенолов, иода, сероводорода и т. д. Все это позволяет на картах выделить районы и свиты пород, наиболее перспективные в отношении нефтеносности.

В областях, где нефтеносность вообще уже известна и где имеется значительное число буровых скважин и источников и геологическое строение и состав вод достаточно изучены, обобщение гидрогеохимических данных позволяет ответить на некоторые конкретные практические вопросы поисков нефти. Важнейшим из таких вопросов является вопрос об условиях, наиболее благоприятных для промышленных концентраций нефти, т. е. вопрос о степени застойности бассей-

нов, решаемый в значительной мере на основе гидрохимических данных (высокая минерализация, повышенные содержания хлоридов кальция, брома и т. д.). Вместе с соответствующими геологическими данными гидрогеохимические показатели используются при составлении карт прогнозов нефтеносности, на которых выделяются районы с большими или меньшими промышленными перспективами. Часто составляются пластовые гидрохимические карты, имеющие целью дать оценку отдельным стратиграфическим горизонтам и выделить в их пределах участки, наиболее перспективные в отношении нефте- или газоносности. На эти карты наносятся разные гидрохимические показатели нефтеносности (общая минерализация, содержание хлора, коэффициенты метаморфизации солевого состава и т. д.).

Гидрогеохимические исследования могут оказать серьезную помощь в проведении не только поисковых, но и разведочных работ. Опыт показывает, что основное значение при этом имеют растворенные в водах битумы, иод, аммоний, отсутствие сульфатов и другие показатели; если первые пробуренные скважины не вскрыли нефтяной залежи в пределах данной площади, но гидрогеохимические показатели являются положительными, это дает основание бурить дальше на еще не вскрытых участках. То же самое относится к новым горизонтам, в пределах которых нефть еще не обнаружена, но гидрогеохимические показатели, полученные по буровым скважинам, дают основания предполагать в этих горизонтах наличие нефти.

В случае доразведки того или иного нефтеносного горизонта геохимические показатели могут дать ценные указания в отношении границ нефтеносных участков, позволяя оконтуривать залежи; для этого можно использовать разные показатели, в зависимости от обстоятельств.

В качестве одной из разновидностей гидрогеохимического метода поисков нефти и газа выделяют водногазовую съемку, заключающуюся в изучении растворенных в водах углеводородных газов. В результате такого изучения удается выделить участки с аномально высокими содержаниями углеводородов, которые должны привлечь к себе внимание.

Если подземная вода на своем пути встречает залежи нефти или горючего газа, она растворяет в себе наряду с другими компонентами также углеводородные газы, в соответствии с их парциальным давлением, растворимостью, минерализацией и температурой. Растворимость газов в воде зависит от давления, температуры и минерализации.

Все это необходимо учитывать при интерпретации результатов водногазовой съемки — необходимо количество газов, обнаруженных в водах, приводить к нормальным условиям (температура, давление, минерализация) с тем, чтобы можно было проводить необходимые сравнения. При проведении водногазовой съемки опробуются родники, буровые скважины, некоторые колодцы. Растворенные газы извлекаются из воды путем нагревания или посредством вакуумирования. Эти газы анализируются в первую очередь на содержание в них метана и суммы тяжелых углеводородов. Если последних достаточно много, производят их разделение на этан, пропан, бутан и т. д. Анализы газов производятся специальными методами, разработанными у нас В. А. Соколовым, П. М. Туркельтаубом и другими авторами. Помимо углеводородов обычно определяются и некоторые другие растворенные в воде компоненты, в том числе сероводород, азот, кислород, углекислый газ и т. д.

Показателями нефтегазоносности в случае водногазовой съемки являются метан, этан, пропан, бутан и другие тяжелые углеводороды. Следует при этом иметь в виду, что метан часто может быть и поверхностного биохимического происхождения, может выделяться из залежей угля, битуминозных сланцев и т. д. или же быть продуктом глубинных магматогенных процессов, не связанных с нефтеносностью. В связи с этим тяжелые углеводороды являются более надежными показателями нефтеносности, поскольку они связаны лишь с нефтяными залежами. При выяснении нефтегазоносности имеют значение и косвенные показатели, вскрываемые при анализе газов, растворенных в водах. Среди них особое значение имеют сероводород, образующийся при десульфатизации вод под влиянием углеводородов и потому обычно являющийся положительным показателем, и кислород, который указывает на окислительную обстановку, неблагоприятную для сохранения и наличия нефти и т. д.

Результаты водногазовой съемки наносят обычно на специальные карты, на которых условными значками отмечают концентрации углеводородных газов, различая отдельные газы окраской (например, метан — голубым цветом, тяжелые углеводороды — красным и т. д.).

Отсутствие углеводородов в водах еще не может служить окончательным доказательством отсутствия на изучаемой площади или в данной свите нефтяных или газовых залежей: углеводородные газы могут отсутствовать в результате некоторых причин. Одна из них — микробиологические процессы;

как показали Г. А. Могилевский и другие исследователи, имеются случаи, когда практически все растворенные в водах углеводородные газы вблизи земной поверхности полностью усваиваются бактериями. В этом случае на помощь водногазовой съемке должна прийти микробиологическая съемка, о чем подробнее будет сказано несколько ниже.

Метод окислительно-восстановительных потенциалов основан на том, что вблизи нефтяных залежей под влиянием неокисленных органических веществ электрические потенциалы между породой, почвой, водой, с одной стороны, и стандартным электродом, с другой, являются пониженными. Это объясняется восстановительными свойствами органического вещества. В общем случае окислительно-восстановительный потенциал среды тем ниже, чем ближе испытуемый образец находится к нефтяной залежи и наоборот. В принципе, как показали исследования автора этого метода В. Э. Левенсона и других специалистов, метод окислительно-восстановительных потенциалов действительно позволяет, вместе с другими методами, делать более обоснованные прогнозы нефтегазоносности. Однако при применении этого метода необходимо учитывать ряд трудностей. Оказалось, например, что окислительно-восстановительный потенциал среды может снижаться не только за счет углеводородов, но также и за счет сероводорода и других восстановителей. С другой стороны, известно, что иногда залежи нефти не оказывают большого влияния на снижение окислительно-восстановительного потенциала среды; некоторые исследователи объясняют это наличием в нефти иода и брома.

Микробиологические методы

При производстве газовой съемки над некоторыми месторождениями нефти впервые в 1937 г. Г. А. Могилевским было установлено, что микроколичества углеводородных газов, содержащихся в подпочвенной атмосфере, испытывают значительные сезонные колебания, а иногда полностью исчезают. Это явление было совершенно правильно объяснено как результат жизнедеятельности особых микроорганизмов, поселяющихся на пути потока углеводородных газов и потребляющих эти газы в разных количествах в зависимости от времени года. Все это послужило основанием для создания специального микробиологического метода поисков нефтяных и газовых месторождений, предложенного и разработанного в основном Г. А. Могилевским.

Вскоре специальными исследованиями как у нас, так и в других странах было показано, что действительно существуют особые классы микроорганизмов, потребляющих (окисляющих) или только метан, или этан и пропан, или другие более тяжелые углеводороды. Бактерии, потребляющие углеводороды, расселяются всюду, где имеются углеводородные газы, т. е. в почвах, коренных породах и в подземных водах, располагающихся выше нефтяных или газовых залежей. Наиболее активно процессы микробиологического окисления углеводородных газов протекают вблизи земной поверхности, хотя иногда эти процессы распространяются и на значительные глубины, как показали исследования образцов пород и вод, взятых из буровых скважин.

Различные виды углеводородной микрофлоры представляют, по выражению Г. А. Могилевского, своеобразный биологический фильтр, способный задержать и переработать значительную часть горючих газов, мигрирующих из глубины к поверхности. Микробиологический метод поисков месторождений нефти и газа, подобно газовой съемке, основывается на явлениях миграции газов через толщу пород, а также на физиологической способности определенных групп микроорганизмов потреблять углеводороды, окисляя их и используя энергию окисления на свои жизненные нужды.

При помощи газовой съемки мы фиксируем ту часть углеводородных газов, которая доходит до поверхности, не успевая на своем пути подвергнуться биологическому окислению, т. е. ту часть газов, которая как бы прошла через биологический фильтр. Что касается микробиологической съемки, то здесь мы имеем дело со скоплениями микроорганизмов, которые возникают в почвах, подпочвах и более глубоких отложениях именно за счет той части газов, которая была задержана этим биологическим фильтром в результате биогенной ассимиляции диффундирующих газов.

Следовательно, истинная мощность углеводородного потока от залежи нефти или газа является суммой двух указанных величин; кроме того, необходимо учитывать некоторую часть газов, которая сорбируется горными породами и растворяется в подземных водах; вначале эта часть является значительной, потом, когда достигнута емкость насыщения пород и вод, эта часть становится практически ничтожно малой.

Благодаря многочисленным исследованиям микробиологов, особенно в связи с поисками нефти и газа, в подземных

водах, вмещающих породах и нефтеносных пластах были установлены разнообразные группы бактерий, играющих большую роль в формировании и разрушении нефтяных и газовых месторождений. Среди этих групп бактерий встречаются: восстанавливающие сульфаты, восстанавливающие нитраты, разлагающие клетчатку в анаэробных условиях, бактерии маслянокислого брожения, бактерии, окисляющие углеводороды, разлагающие белковые вещества, бактерии нитрификаторы и т. д.

Под влиянием разрушающей деятельности бактерий в подземных условиях происходит обычно превращение твердых и жидких органических веществ в газообразные вещества — углекислый газ, азот, воду, водород, метан, сероводород, аммиак и др. Это разрушение органических веществ происходит главным образом в результате деятельности гетеротрофных организмов в анаэробных условиях.

При поисках нефти и газа в настоящее время используют различные микроорганизмы, которые можно считать своеобразными индикаторами этих полезных ископаемых. Как и прочие индикаторы, они могут быть прямыми и косвенными. В качестве прямых индикаторов используются бактерии, окисляющие углеводороды, в качестве косвенных — бактерии десульфуризаторы и бактерии, окисляющие водород.

Наибольший интерес представляют прямые индикаторы — бактерии, окисляющие метан или этан, или другие более тяжелые углеводороды.

Бактерии, окисляющие метан, известны с 1905 г. Они наиболее широко распространены в природе, присутствуя как в поверхностных, так и в глубинных породах и водах, и широко используются при поисках нефти и газа. В настоящее время используются также бактерии, окисляющие пропан; они впервые были обнаружены в 1939 г. при проведении микробиологических работ в Майкопском районе и оказались весьма характерными индикаторами при поисковых работах на нефть. Эти бактерии не могут усваивать метан и этан, но хорошо усваивают наряду с пропаном другие более тяжелые углеводороды (бутан, пентан, гексан и т. д.). Вне нефтяных и газовых месторождений пропановые бактерии не встречаются. Бактерии, окисляющие этан, известны, но обнаруживаются они на нефтяных месторождениях редко, почему и не получили пока поискового значения; то же самое относится и к бактериям, окисляющим тяжелые углеводороды, они тоже пока мало используются.

Способностью окислять метан и особенно пропан обла-

дают немногие группы организмов, что выгодно отличает их от микроорганизмов, способных окислять более тяжелые углеводороды; этой способностью обладают многие гетеротрофные бактерии. При микробиологическом изучении грунтов и вод, содержащих метановые и пропановые бактерии, было показано, что они могут развиваться лишь в атмосфере соответствующего газа — метана или пропана в смеси с воздухом.

Было найдено, что для нормального развития углеводородных бактерий достаточны концентрации газа, измеряемые



Рис. 28. Схематическая карта микробиологической грунтовой съемки, проводившейся в 1943 г. на разведочной площади в районе Среднего Поволжья, в сопоставлении с данными последующего бурения (по Г. А. Могилевскому):

1 — зоны распространения бактерий, окисляющих пропан; 2 — зоны распространения бактерий, окисляющих метан; 3 — изогипсы опорного горизонта; 4 — скважины проектируемые; 5 — скважины, давшие нефть; 6 — скважины непродуктивные

водная съемка, при которой объектом изучения служат грунтовые и пластовые воды.

Сущность метода заключается в стерильном отборе и последующем биологическом анализе проб воды из родников, источников, колодцев и буровых скважин. Микроорганизмами-индикаторами в данном случае являются бактерии, окисляющие метан или пропан, а также бактерии, развивающие-

тысячными и даже десяти-тысячными долями процента; подобные концентрации углеводородных газов в почвах и грунтах являются обычными для нефтяных и газовых месторождений. При наличии достаточно развитой углеводородной микрофлоры газы, мигрирующие из нефтяной или газовой залежей, могут быть полностью окислены. В этом случае методами газовой съемки указанные месторождения обнаружить невозможно, здесь весьма удобным оказывается применение микробиологической съемки (рис. 28).

При проведении микробиологических исследований пробы воды и грунтов можно отбирать с разных глубин — из подпочвы и из буровых скважин. Наиболее широко сейчас применяется

ся в атмосфере одного из тяжелых углеводородов — пентана, гексана или гептана. Водная съемка носит рекогносцировочный характер, она позволяет по небольшому числу проб составить общее впечатление о наличии или отсутствии в подземных водах указанных бактерий. Эта съемка проводится одновременно с газовыми и гидрохимическими исследованиями вод. При более детальных исследованиях применяется грунтовая съемка, основанная на отборе и последующем микробиологическом анализе образцов подпочвенных отложений на присутствие бактерий, окисляющих метан и пропан. Пробы отбираются из мелких, специально пробуренных скважин глубиной 2—3 м, а также из канав и шурфов; иногда опробуются скважины на глубину до 15—30 м по отдельным опорным профилям. Задачей грунтовой микробиологической съемки в конечном счете являются поиски и оконтуривание углеводородных ореолов, сопровождающих нефтяные и газовые залежи.

Иногда на присутствие бактерий-индикаторов обследуются керны скважин колонкового бурения; наличие указанных бактерий позволяет судить об углеводородных ореолах, располагающихся на значительных глубинах от поверхности, что часто имеет большое значение, особенно в случаях, когда эти глубинные биологические барьеры перехватывают поток углеводородных газов и не позволяют ему проявить себя в поверхностных отложениях. Этот род микробиологических исследований носит название биокаротажа.

Перечисленные выше разновидности микробиологических исследований — водная съемка, грунтовая съемка и биокартаж — основаны на изучении бактерий, обитающих в соответствующих природных объектах: водах, грунтах, кернах и т. д. Для определения дебита углеводородных газов, диффундирующих через породы, можно в скважины опускать на 12—14 дней набор бактериальных культур, способных потреблять углеводородные газы: метан, этан, пропан — и жидкие углеводороды. Если имеется подток того или иного газа, происходит развитие соответствующих бактерий, что может быть оценено количественно в микробиологических лабораториях. Эта бактериодебитная съемка пока не получила практического применения вследствие трудоемкости операций.

Микробиологические поисковые работы проводились в ряде районов СССР, в Польше, Венгрии и других странах и, как правило, давали положительные результаты. Особенно хорошими индикаторами нефти и газа оказались пропаноки-

сляющие бактерии; по данным Г. А. Могилевского, пропаноксиляющие бактерии при проведении водной микробиологической съемки были обнаружены в таких районах, как южная часть Молдавской ССР, юго-восточная часть Татарии, западная часть Жигулевской дислокации задолго до того, как эти территории стали разбуриваться. В этих районах указанные бактерии действительно явились прямыми геохимическими индикаторами месторождений нефти.

Во многих случаях результаты бактериальной съемки совпадают с результатами газовой, т. е. контуры углеводородных ореолов, намечаемые на картах, в том и другом случае примерно совпадают. Но бывают случаи, когда данные этих двух видов съемки существенно различаются. Известны примеры, когда аномалийные зоны, соответствующие нефтяным или газовым месторождениям, не были вскрыты газовой съемкой, но хорошо отбились в результате микробиологических исследований (Мельниковское газовое месторождение, некоторые нефтяные залежи в Туймазинском районе, на Украине и т. д.). Подобные случаи объясняются, как мы уже видели, тем обстоятельством, что углеводородные газы были почти полностью захвачены бактериальным фильтром. Но бывают и обратные случаи: по растворенным или свободным углеводородным газам аномалии над залежами оконтуриваются гораздо более контрастно, чем по микробиологическим показателям; это обычно наблюдается при изучении глубинных горизонтов, где условия для развития соответствующих типов бактерий являются неподходящими (мало или совсем нет свободного кислорода). Все сказанное следует учитывать при проведении геохимических поисковых работ на нефть и газ.

Рядом исследователей высказывалось в свое время предположение, что пропаноксиляющие бактерии не являются надежными индикаторами на пропан в подпочвенном воздухе, так как эти организмы способны развиваться и на иных органических веществах. С. И. Кузнецов в своем докладе «Обоснование микробиологических методов поисков нефтяных и газовых месторождений»¹ привел убедительные доказательства в пользу того, что развитие углеводородной микрофлоры в подпочве, откуда отбираются пробы, происходит не за счет использования готового органического вещества растительных остатков, а за счет проникновения углеводо-

¹ Сб. «Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений», 1959.

родных газов из глубин нефтяных или газовых залежей. Действительно, в процессе минерализации растительных остатков в почве и подпочве принимает участие большое количество микроорганизмов, главным образом сапрофитных бактерий. Количество этих бактерий в почве исчисляется несколькими миллионами на 1 г почвы, что в сотни тысяч раз превышает количество бактерий, окисляющих углеводороды, в том числе пропановых бактерий. Следовательно, в борьбе за готовое органическое растительное вещество в почвах пропанокисляющие бактерии находятся в очень невыгодном положении. Важно также отметить, что процессы минерализации органического вещества в почве происходят в самом поверхностном слое, глубиной в 20—30 см, где сосредоточена подавляющая масса сапрофитных бактерий, разрушающих растительные остатки. В подпочве же, на глубине около 2 м, откуда обычно берутся образцы грунтов для обнаружения углеводородной микрофлоры, растительные остатки практически не встречаются за исключением отдельных корней некоторых растений.

Радиометрические методы

В последние годы для поисков месторождений нефти стали применять радиометрические методы. Рядом исследований (особенно Г. Лундберг в США, Ф. А. Алексеев и другие в СССР) было эмпирически установлено, что над нефтеносными структурами наблюдается пониженное значение интенсивности γ -поля земной поверхности, по сравнению со среднефоновыми значениями. Одновременно было замечено, что граница контура газонефтяной залежи характеризуется повышенными значениями γ -активности. В связи с этим стали проводить поиски нефтяных месторождений, используя радиометры, устанавливаемые на автомобилях и самолетах, подобно тому как это делается при поисках урановых руд.

Природа указанного явления, по данным В. И. Баранова, Н. Г. Морозовой и других¹ объясняется распределением всех радиоактивных элементов — U, Ra, Th и K — в поверхностном (до 25 см) почвенном слое. Наблюдаемые аномалии имеют обычно очень малую амплитуду, составляющую, как правило, не больше 30% от среднего значения γ -активности по профилю, поэтому их нетрудно пропустить. Эти аномалии нельзя

¹ В. И. Баранов, Н. Г. Морозова. К вопросу о радиометрическом методе поисков газонефтяных месторождений. «Геохимия», 1959, № 6.

объяснить распределением лишь одного радия, как пытались это сделать некоторые авторы; проведенные исследования по изучению распределения этого элемента не подтвердили таких предположений. Повышенные значения γ -активности на границах контуров нефтегазовых залежей Г. Лундберг и другие исследователи связывали с возможно повышенными концентрациями радона, диффундирующего вместе с нефтяными газами. Исследования указанных авторов не подтвердили и этой гипотезы; содержание радона и торона в нефтяных газах оказалось не повышенным, а, наоборот, сильно пониженным — примерно на порядок ниже, чем среднее содержание в почвенном воздухе ($2 \cdot 10^{-10}$ кюри/л) при обычных кларковых концентрациях радиоактивных элементов в породах. Следовательно, связывать повышенную γ -активность на границе контуров с нефтяными газами, по-видимому, нет оснований. Вопрос о причинах указанных γ -аномалий пока нельзя считать окончательно решенным, однако это обстоятельство не умаляет важного практического значения сделанных эмпирических обобщений.

Глава 9. ДРУГИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Помимо рассмотренных выше, наиболее широко известных геохимических методов поисков, в последние годы были предложены и некоторые другие, также основанные на тех или иных геохимических предпосылках.

Использование изотопного состава элементов для поисков их руд

Как известно, изотопный состав химических элементов, извлеченных из природных объектов, строго говоря, не является постоянным, а несколько меняется в зависимости от тех условий, в которых находились эти элементы. Поэтому в общем виде изотопный состав элементов, взятых из месторождений разных типов, т. е. образовавшихся под влиянием разных условий, должен быть несколько различным; это в настоящее время нужно считать доказанным для серы, кислорода и некоторых других элементов. Следовательно, изучение изотопического состава элементов может помочь решить вопрос о генезисе их месторождений, тем самым облегчить задачу их поисков. Сделано в этом направлении пока немного, но исследования продолжают и есть основания ожидать, что в будущем, когда методы определения изотопного состава будут более точными и широко доступными, в этой области будут получены важные результаты.

Но есть одна группа элементов, где уже и сейчас в результате изучения изотопного состава получены важные для

целей поисков результаты. Это группа радиоактивных элементов урана и тория. Как известно, эти элементы спонтанно распадаются, образуя в качестве конечных стабильных продуктов радиогенные изотопы свинца Pb^{206} (из U^{238}), Pb^{207} (из U^{235}) и Pb^{208} (из Th^{232}). Четвертый изотоп свинца — Pb^{204} радиоактивных предшественников не имеет.

Известно, что свинец, извлеченный из свинцовых месторождений, из метеоритов или из различных минералов и горных пород, всегда представляет смесь указанных четырех изотопов. Исключение представляет свинец, извлеченный из чистых урановых или ториевых минералов. В первом случае он при идеальных условиях может практически представлять смесь лишь двух урановых свинцов (Pb^{206} и Pb^{207}), во втором случае может оказаться почти чистым изотопом ториевого свинца Pb^{208} .

Известно, что количество радиогенного свинца, образующегося за счет распада радиоактивных изотопов урана и тория, с течением времени закономерно возрастает, на этом основаны свинцовые методы определения абсолютного возраста минералов, использующие отношения

$$\frac{Pb^{206}}{U^{238}}, \frac{Pb^{207}}{U^{235}}, \frac{Pb^{208}}{Th^{232}}.$$

Ясно, что в ходе геологической истории количество радиоактивных изотопов свинца постепенно закономерно возрастает, в то время как количество нерадиогенного Pb^{204} остается практически постоянным; следовательно, в ходе геологической истории закономерно, в соответствии со скоростью распада материнских радиоактивных изотопов U^{238} , U^{235} и Th^{232} будут увеличиваться и отношения

$$\frac{Pb^{206}}{Pb^{204}}, \frac{Pb^{207}}{Pb^{204}} \text{ и } \frac{Pb^{208}}{Pb^{204}}.$$

Другими словами, атомный вес свинца в ходе геологической истории все более и более утяжеляется за счет относительного возрастания доли радиогенных, более тяжелых изотопов. При этом меняется и само соотношение изотопов, так как скорость образования разных радиогенных изотопов разная.

Если принять содержание нерадиогенного свинца Pb^{204} за единицу, тогда содержание в обыкновенном, нормальном свинце отдельных его изотопов изобразится примерно такими цифрами: $Pb^{206} = 17,9$; $Pb^{207} = 15,27$; $Pb^{208} = 37,55$.

Расчеты показывают, что 5 млрд. лет тому назад (примерно таким принимают сейчас возраст нашей планеты) состав нормального свинца был существенно иным; в нем (по отношению к Pb^{204}) было Pb^{206} около 7, Pb^{207} около 5 и Pb^{208} около 28.

Таким образом, если бы нормальный для того времени свинец указанного состава образовал месторождение, которое было бы лишено радиоактивных элементов и в которое не поступали бы извне радиогенные изотопы свинца, состав этого нормального свинца оставался бы неизменным. В действительности такие идеальные условия в природе едва ли когда-нибудь осуществляются: обыкновенно к свинцу все более примешиваются радиогенные изотопы, в результате чего он с течением времени все более утяжеляется и приближается по своему составу к нормальному (для настоящего времени) свинцу.

Наряду с нормальным или обыкновенным свинцом встречаются свинцы с аномальным составом, в которых количество радиогенных изотопов значительно превышает норму.

Если обратиться к месторождениям радиоактивных руд, то совершенно очевидно, что изотопный состав свинцов, извлеченных из этих месторождений, также будет аномальным, причем в нем доля радиогенных изотопов будет тем больше, чем древнее месторождения и чем меньше нормального свинца присутствовало в пределах месторождения в момент его образования.

Ясно, что свинцы урановых месторождений будут обогащены изотопами Pb^{206} и Pb^{207} , а свинцы ториевых месторождений — изотопом Pb^{208} . Имеющиеся данные вполне подтверждают эти выводы. Так, например, изотопный состав галенитов месторождения Хэппи Джек Майн (Колорадо, США) показал содержание Pb^{206} , равное 92,62 (при $Pb^{204}=1$), для месторождения Моньюмент № 2 (там же) — 88,81, для Витватерсранда (Южно-Африканская Республика) — соответственно 58,94 и т. д. Таким образом, аномальный состав свинца и обогащение его радиогенными изотопами в общем могут указывать на наличие в данном районе урановых или ториевых месторождений.

Д. Я. Суражский и А. И. Тугаринов¹ подробно рассмотрели этот вопрос и пришли к выводу, что хотя многие моменты, относящиеся к проблеме использования изотопных отно-

¹ Д. Я. Суражский и А. И. Тугаринов. Об использовании изотопного состава свинца для поисков урановых руд. «Атомная энергия», 1960, вып. 1.

шений в свинце для практических целей поисков радиоактивных руд пока еще не полностью выяснены, однако сама возможность такого использования в общем не вызывает сомнений.

Анализ имеющихся фактов привел указанных авторов к выводу, что появлению аномальных свинцов, обогащенных изотопами Pb^{206} и Pb^{207} , способствовали следующие геологические процессы.

1. Быстрое накопление осадков за счет интенсивной эрозии древних урановых месторождений. Свинец этих осадков будет аномальным; в случае благоприятных геохимических условий он может дать жильные или метасоматические месторождения. Например, в Средней Азии месторождения свинца в меловых отложениях характеризуются аномальным изотопным составом в результате эрозии варисских урановых и ториевых месторождений. Что касается более древних месторождений карбонового и девонского возраста, то они характеризуются свинцом нормального изотопного состава.

2. Ассимиляция магмой и глубинная гранитизация осадков с повышенным содержанием урана. Очевидно, что количество радиогенных изотопов в составе свинца будет тем больше, чем относительно древнее осадки с повышенным содержанием радиоактивных элементов. Этой причиной авторы объясняют, в частности, аномальный состав свинцов варисского возраста на Украине, предполагая, что здесь большую роль сыграли породы докембрийского фундамента, обогащенные радиоактивными элементами.

3. Гидротермальный метаморфизм древних урановых месторождений с обособлением радиогенного свинца и урана. В непосредственной близости от рудных тел в галенитах содержатся практически лишь Pb^{206} и Pb^{207} ; вдали от этих тел, на расстоянии нескольких сотен метров от них, галениты содержат иногда лишь нормальный свинец. Таким образом, аномальный свинец подобного происхождения может рассматриваться как хороший индикатор недалеко расположенных урановых рудных тел. Очевидно, что подобные же рассуждения справедливы и по отношению к месторождениям тория: аномальные содержания в свинце изотопа Pb^{208} будут указывать на близко расположенное месторождение ториевых руд.

Однако, делая подобные практические выводы, необходимо учитывать, что аномальный свинец может образоваться и вне генетической связи с месторождениями радиоактивных элементов; так, известны случаи, когда радиогенный

свинец выщелачивается из урансодержащих пород. В данном случае аномальный состав свинца не будет указывать непосредственно на близко расположенные урановые месторождения, а лишь вообще на повышенный урановый фон горных пород, что, как известно, является в общем виде благоприятным фактором, так как при прочих равных условиях с такими породами особенно вероятны будут и генетически связанные месторождения. Следовательно, здесь обогащение свинца радиогенными изотопами будет указывать на металлогеническую специфику магм, их обогащение радиоактивными элементами и позволит в первом приближении положительно оценить металлогению района.

4. Известно, что часто уран из зоны окисления почти полностью выщелачивается; это особенно характерно для областей с гумидным климатом. В подобных случаях, изучая зону гипергенеза и не находя в ней урана, можно пропустить урановые руды, залегающие на некоторой глубине от поверхности. Изучение изотопного состава свинцов, слагающих относительно устойчивые минералы зоны окисления, в том числе церуссит и вольфенит, может в этих условиях оказать несомненную пользу: аномальный изотопный их состав укажет на близость уранового оруденения.

Таким образом, подводя итоги сказанному, можно прийти к выводу, что изучение изотопного состава свинцов окажется в ряде случаев полезным, позволяя выделять территории, обогащенные радиоактивными элементами, а иногда и указывая на относительно близко расположенные рудные тела, обогащенные ураном или торием. Правда, пока указанный метод является очень трудоемким и дорогим; поэтому он пока не нашел широкого практического применения. В будущем, в связи с успехами техники, положение может коренным образом измениться и изотопные анализы могут оказаться достаточно доступными для обычных поисковых партий.

Нейтронный каротаж

В 1941 г. Б. Понтекорво предложил для поисков месторождений метод нейтронного каротажа. Этот метод основан на том, что при облучении горной породы быстрыми нейтронами и захвате их ядрами атомов элементов возникает вторичное гамма-излучение. Характер и интенсивность этого излучения измеряются специальными детекторами γ -излучения; это метод нейтронного γ -каротажа (НГК). Кроме того, быстрые нейтроны испытывают торможение в окружающих

породах и замедляются до тепловых скоростей; измерение плотности тепловых нейтронов на некотором расстоянии от источника также дает указание на характер элементов и на их концентрацию на пути быстрых нейтронов — это собственно нейтронный каротаж (НК). Чтобы провести нейтронный каротаж или нейтронный γ -каротаж, в буровую скважину опускают специальный прибор — генератор быстрых нейтронов (обычно полониево-бериллиевый источник), а на некотором расстоянии от него — детектор плотности тепловых нейтронов или детектор γ -излучения.

Особенно значительно замедляются нейтроны атомами водорода, вне зависимости от его формы. Поэтому при большом содержании в породе водорода, например в форме воды или нефти, процессы захвата нейтронов и обусловленные ими вторичные γ -излучения будут протекать по преимуществу вблизи генератора нейтронов; если содержание в породе водорода уменьшается — область захвата нейтронов и генерации γ -излучений соответственно расширяется. Все это широко используется в нефтепромысловом деле при индикации водородсодержащих пород, в том числе нефтеносных и газоносных свит, водонасыщенных горизонтов и т. д.

Помимо водорода сильно поглощают нейтроны и некоторые другие элементы, содержащиеся в горных породах; сюда относятся бор, хлор, литий, серебро, кадмий, некоторые редкие земли и др.

В Институте геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского на этой основе был разработан в последние годы метод нейтронного каротажа для поисков промышленных концентраций бора, а также метод нейтронно-борометрического профилирования¹.

Специально проведенными работами на месторождениях боратов было показано, что метод нейтронного каротажа позволяет быстро и достаточно точно выделять в скважинах интервалы пород, содержащие повышенные концентрации бора. Особенно важно то, что при этом не требуется отбирать керн и, более того, можно производить каротаж при наличии обсадных труб, поскольку нейтроны слабо задерживаются ими. Помимо бора, указанный метод нейтронного каротажа скважин может быть применен при поисках ряда других элементов, обладающих большим сечением захвата, в том числе перечисленных выше.

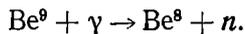
Была сконструирована специальная установка, позволяю-

¹ «Геохимия», 1956, № 2; 1960, № 6 и др.

шая использовать нейтронные методы для изучения содержания бора в поверхностных отложениях. Эта установка, включающая полониево-бериллиевый источник нейтронов, а также детекторы нейтронов и γ -квантов, смонтирована на скользящем прицепе к автомашине. Запись показаний счетчиков производится на диаграммной ленте самописцем, установленным на машине. Результаты проведенных опытных работ показали, что нейтронные методы оценки содержания бора в поверхностном пласте мощностью до 20 см могут с успехом заменить обычную металлометрическую съемку, так как являются гораздо более быстрыми и позволяют в короткий срок охватить большие площади. Особенно ценным является то обстоятельство, что результаты борометрической съемки получаются непосредственно в процессе работы, будучи записанными на диаграмму, что позволяет быстро корректировать планы поисковых работ в зависимости от полученных результатов.

Ядерно-физические методы успешно используются также при геохимических поисках бериллиевых руд. Определение содержания бериллия при этом производится фотонейтронным методом, основанным на измерении эмиссии нейтронов ядрами бериллия при облучении пород γ -лучами.

Реакция (γ, n) на бериллий протекает под действием γ -лучей, энергия которых превышает порог фотонейтронной реакции:



Ядро бериллия обладает наименьшей энергией связи нейтронов, всего около 1,666 мэв. Ближайшим низким порогом фотонейтронной реакции обладает дейтерий (2,226 мэв), для большинства элементов энергия связи нейтронов составляет около 8 мэв.

Применяя в качестве источника γ -лучей радиоактивный изотоп сурьмы Sb^{124} (период полураспада 53,7 дней) с энергиями излучения 1,7—2,1 мэв, удается обеспечить высокую избирательность фотонейтронной реакции на бериллий. В качестве детекторов нейтронов используются пропорциональные борные счетчики или специальные сцинтилляторы.

Чувствительность фотонейтронных бериллометров достигает $1 \cdot 10^{-5}$ % Be, что позволяет весьма эффективно применять их для поисков вторичных ореолов рассеяния бериллия без отбора проб (путем геохимического профилирования на местности), для исследования проб в лаборатории и для ка-

ротажа скважин, с непрерывной регистрацией содержаний бериллия в породах ¹.

Ядерно-физические методы каротажа скважин и поверхностного геохимического профилирования, по-видимому, найдут в ближайшем будущем широкое применение при поисках и разведке не только нефти, бериллия и бора, но, вероятно, и ряда других полезных ископаемых.

¹ Х. Б. Ме ж и б о р с к а я. Фотонейтронный метод определения бериллия. Атомиздат, М., 1961.

Глава 10. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВЫХ РАБОТ

Проведение тех или иных поисковых работ зависит от ряда природных условий, в том числе от геолого-структурного положения исследуемого района, геоморфологических условий, характера рыхлых отложений, биоклиматической зональности.

В. И. Красников («Рациональные поиски рудных месторождений») совместно с О. А. Глико выделяет 3 типа региональных структур (рис. 29), характеризующихся различными условиями ведения поисковых работ.

I. Поднятые и в разной степени эродированные щиты и складчатые области разного возраста с интенсивными проявлениями магматизма и метаморфизма и преобладающей субвертикальной ориентировкой рудных структур. Эти структуры хорошо вскрываются тектоническими и денудационными процессами и характеризуются обилием и разнообразием поисковых признаков. В подобных условиях проведение поисковых работ облегчено непосредственным эрозийным вскрытием пород и месторождений. Для СССР площадь этих районов составляет около 38% всей территории.

II. Открытые районы платформ, характеризующиеся двухъярусным строением. Верхний ярус сложен обычно слабо дислоцированными осадочными породами со свойственными им полезными ископаемыми, слагающими субгоризонтальные пласты и линзы; иногда (например, на Сибирской платформе) структура верхнего яруса осложнена разломами и интрузиями разного состава. Нижний структурный ярус плат-

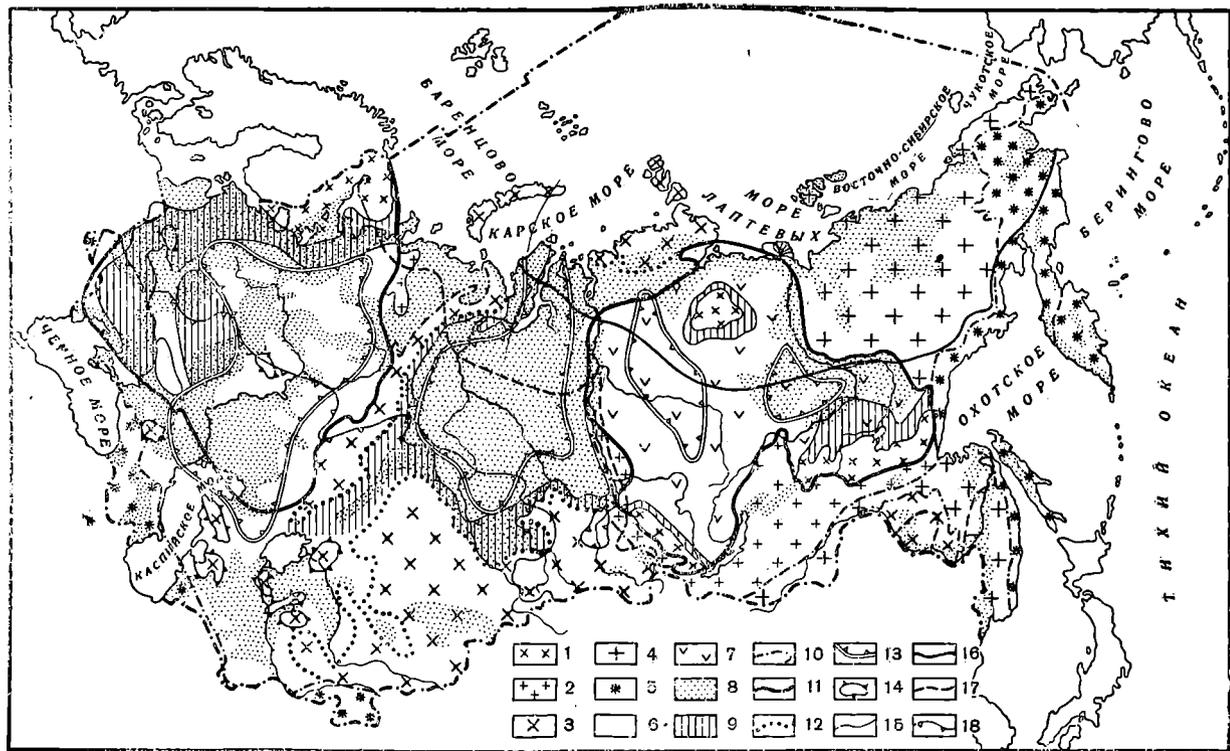


Рис. 29. Схема районирования территории СССР по природным условиям ведения геологопоисковых работ (по В. И. Красникову и О. А. Глико):

1—8 — основные типы региональных геологических структур; 1—2 — подтип IA — щиты (1) и поднятые байкалиды (2); 3—5 — подтип IB — поднятые складчатые области; палеозойского (3), мезозойского (4) и кайнозойского (5) возраста; 6 — подтип IIA — открытые районы платформ без существенных проявлений позднейшего магматизма; 7 — подтип IIB — открытые районы Сибирской платформы, существенно затронутые основным магматизмом; 8 — подтип III — закрытые районы с региональным покровом аллохтонных четвертичных отложений аллювиального, ледникового, озерного, морского, эолового и смешанного происхождения; 9 — краевые части платформ и плит с глубокой залегания нижнего структурного яруса менее 1000 м; 10 — границы складчатых областей различного возраста; 11 — границы платформ; 12 — границы между опущенными и поднятыми областями; 13 — границы краевых частей платформ и плит, прилегающих к областям сноса; 14 — поднятия в пределах платформ; 15 — границы выделенных структурных элементов; 16 — южная граница распространения островной «вечной мерзлоты»; 17 — южная граница распространения сплошной «вечной мерзлоты»; 18 — граница между северной (гумидной) и южной (аридной) зонами

форм представлен складчатым основанием метаморфических пород с существенным участием интрузивных пород. Месторождения этого яруса (за исключением, может быть, нефти и газа) представляют в настоящее время промышленный интерес лишь в том случае, если мощность пород верхнего яруса не превышает нескольких сотен метров, что обычно бывает в краевых зонах платформ и вокруг поднятий в их центральной части. Методика поисковых работ в открытых районах платформ является комбинированной: месторождения верхнего яруса иногда бывают вскрыты естественными процессами эрозии и денудации и поиски их могут вестись обычными визуальными методами. Но это относится обычно лишь к небольшим площадям; чаще всего и для месторождений, залегающих в верхнем структурном ярусе, а тем более во всех случаях, когда они залегают в нижних горизонтах, необходимо применение геофизических и геохимических методов поисков с обязательным вскрытием глубоких горизонтов системой опорных картировочных и поисковых скважин. Площади второго типа составляют в СССР около 27%.

III. Закрытые районы с региональным развитием мощного покрова рыхлых отложений обычно четвертичного возраста. Они занимают в СССР около 35% всей площади. Для этих районов характерно почти полное отсутствие естественных обнажений дочетвертичных пород, в связи с чем поисковые работы обычными визуальными методами практически невозможны; необходимо бурение в сочетании с глубинными геофизическими исследованиями и комплексным изучением разрезов по скважинам, в том числе с детальным геохимическим изучением керна. Месторождения в рыхлом покрове выявляются методами металлометрии и шлихового анализа; если в их составе есть радиоактивные или магнитные минералы, можно применять соответствующие наземные или воздушные радиометрические или магнитные съемки.

На выбор рациональных методов поисков оказывают важное влияние также геоморфологические условия, поскольку геоморфология района отражает степень его обнаженности, характер рыхлого покрова, а также специфику почв и растительности. Различают эрозионно-тектонические формы рельефа, которые формируются при общем поднятии мобильных участков земной коры, и их денудации и аккумулятивные формы, образующиеся за счет аккумуляции осадков в местах общего понижения земной поверхности.

Совершенно ясно, что эрозионно-тектонические формы

рельефа (горы, плоскогорья и др.) более благоприятны для проведения поисковых работ, чем аккумулятивные формы (например, аллювиальные равнины, занимающие огромные площади на Русской и Сибирской платформах, в Западно-Сибирской низменности и в других районах СССР, а также межгорные котловины и предгорные равнины). Области развития аккумулятивных форм рельефа обычно не имеют обнажений, перекрыты мощными молодыми отложениями (аллювиальными, ледниковыми, озерными, эоловыми, морскими) и потому неблагоприятны для поисков месторождений, которые залегают под ними.

Что касается полезных ископаемых, связанных непосредственно с самыми молодыми рыхлыми отложениями, особенно аллювиальными и морскими (россыпями золота, платины, олова, титана, тория, редких земель, циркона и других устойчивых минералов), то поиски их проводятся давно известным шлиховым методом, путем выявления механических ореолов и потоков рассеяния этих элементов. Таким образом, шлиховой метод можно рассматривать как один из древнейших геохимических методов поисков.

Огромную как положительную, так и отрицательную роль для выбора методов поисков играет рыхлый покров, представленный в основном континентальными отложениями четвертичного, редко более древнего возраста. С одной стороны, в самом рыхлом покрове развиваются вторичные ореолы и потоки рассеяния, которые могут быть использованы для поисков коренных месторождений многих элементов. Кроме того, иногда в пределах этих ореолов концентрация полезных элементов или минералов достигает промышленных значений и тогда сами ореолы являются объектом промышленной эксплуатации; таковы перечисленные выше золото, платина, титан, торий и др. Следует оговориться, что иногда промышленные россыпи образуются не за счет разрушения коренных месторождений, а за счет концентрации минералов, первоначально содержащихся в рассеянном состоянии в горных породах. Особенно это относится к монациту и касситериту, промышленные россыпи которых обычно образуются в результате гипергенного разрушения гранитов, содержащих указанные минералы. Но чаще всего роль рыхлых отложений для поисков глубинных месторождений является отрицательной, особенно когда эти отложения являются аллохтонными и имеют большую мощность: в этом случае они не только перекрывают месторождения, но скрывают от пропектора и все другие поисковые признаки.

В закрытых районах четвертичный покров охватывает огромные территории; рыхлые отложения аллохтонного типа выполняют также речные долины, межгорные впадины, предгорные пролювиальные долины, конусы выноса и т. д. Чем больше возрастает мощность рыхлых отложений и чем больше в их составе аллохтонного материала, тем все более и более захороняются ореолы рассеяния и тем все труднее становится судить о залегающих под этими отложениями горных породах и месторождениях. В. И. Красников ввел понятие критической мощности четвертичного покрова, при котором исчезают уже все наблюдаемые с поверхности поисковые признаки. Эта мощность определяется местными условиями и различна для разных районов.

В методическом отношении он различает площади четырех категорий.

Площади I категории, обнаженные или покрытые маломощными (1—2 м) элювиально-делювиальными отложениями автохтонного типа. Здесь проявлены открытые ореолы нормальной интенсивности, а также многие другие поисковые признаки.

Площади II категории, перекрытые делювиальными отложениями мощностью около 5 м; в верхнем слое преобладает аллохтонный материал. Ореолы рассеяния у поверхности ослаблены за счет аллохтонного материала; другие поисковые признаки проявлены также слабо.

Площади III категории, перекрытые в основном аллохтонными отложениями значительной мощности (20—30 м); ореолы рассеяния погребены, но неглубоко; другие поисковые признаки отсутствуют за исключением некоторых геофизических и геохимических (капиллярный подъем грунтовых вод, растения с особо глубокой корневой системой и др.).

Площади IV категории, перекрытые мощным покровом аллохтонных отложений (многие десятки — сотни метров); ореолы рассеяния погребены глубоко; поисковые признаки отсутствуют, за исключением некоторых геофизических.

Из всего сказанного совершенно ясно, что по условиям ведения поисковых работ все указанные площади существенно различаются. Легче всего проводить поиски на площадях первой категории и труднее всего — на площадях четвертой категории. Имеющиеся многочисленные данные показывают, что большинство рудных месторождений, выявленных до сих пор в СССР, располагаются на площадях первой категории, характеризующихся непосредственными выходами на поверхность самих месторождений или открытых ореолов нормаль-

ной интенсивности; значительно меньше месторождений выявлено на площадях второй категории, перекрытых рыхлыми отложениями до 5 м и больше. Что касается площадей третьей и четвертой категорий, то они совсем недоступны для обычных визуальных поисков и требуют применения поискового бурения, геофизических и геохимических методов; именно поэтому они обычно кажутся лишенными месторождений.

На площадях первой категории помимо обычных визуальных геологических методов с успехом применяется металлометрическая съемка. На площадях второй категории эффективность металлометрической съемки снижается, причем тем более, чем больше в составе рыхлых отложений содержится аллохтонного материала и чем больше мощность этих отложений. Здесь практически не эффективными становятся наземные гамма-съемки, автомобильные и воздушные радиометрические методы; для проведения эманационной съемки в этих условиях следует пробы воздуха брать со значительной глубины. На площадях этой категории можно применять гидрогеохимический и биогеохимический методы.

Площади третьей категории перекрыты еще более мощными рыхлыми отложениями; для поисков залегающих под ними месторождений можно применять глубинные металлометрические съемки, гидрогеохимические методы, в некоторых случаях — биогеохимические. Эти работы должны сопровождаться разбуриванием покрова рыхлых отложений с комплексным изучением скважин. В еще большей мере это относится к площадям четвертой категории, для которой из геохимических методов доступными могут быть лишь гидрогеохимические и некоторые атмосферические (для поисков каустобиолитов).

Месторождения, располагающиеся на площадях первой категории, в основном относятся к категории легкооткрываемых, частично к труднооткрываемым; все другие площади содержат лишь труднооткрываемые месторождения. Ореолы рассеяния легкооткрываемых месторождений обычно выходят непосредственно на поверхность и, следовательно, могут быть открыты прямыми визуальными наблюдениями в результате, например, обычных пешеходных маршрутов или с помощью металлометрических съемок с поверхности. Поиски труднооткрываемых месторождений значительно сложнее, и выбор методов для их обнаружения зависит от того, какова причина, обусловившая их глубинное залегание. С этой точки зрения все труднооткрываемые месторождения можно разбить на 2 группы: 1) нескрытые, 2) перекрытые.

К невоскрытым месторождениям относятся такие, которые были образованы на глубине и рудные тела которых еще не вскрыты современным эрозийным срезом.

К перекрытым месторождениям относятся те, которые когда-то выходили на земную поверхность, но потом были погребены под покровом более молодых осадочных или вулканогенных пород, или под толщей молодых рыхлых отложений. Иногда месторождения могут быть перекрыты и более древними породами — в случае, например, их надвига на породы, вмещающие эти месторождения. Совершенно очевидно, что в природе еще более распространены такие случаи, когда месторождения первой группы (невскрытые) вместе с вмещающими их породами перекрыты затем другими породами или рыхлыми отложениями.

В. И. Красников выделяет кроме указанных двух типов еще третий — месторождения скрытые (замаскированные). В эту группу он относит месторождения, экранированные растительным покровом (леса, степи, тундры), а также все другие месторождения, выходящие на поверхность, но не сопровождающиеся визуально наблюдаемыми поисковыми признаками.

Чрезвычайно важным является вопрос о соотношении легкооткрываемых и труднооткрываемых месторождений. Здесь, конечно, трудно дать точные цифры, но примерные расчеты для отдельных территорий и для всего Советского Союза можно привести. Подобные расчеты для рудных месторождений были сделаны недавно В. И. Красниковым. Согласно его данным:

а) в пределах щитов и поднятых складчатых областей, занимающих 38% территории СССР, на долю труднооткрываемых месторождений приходится около 70% от числа всех возможных в зоне эксплуатации месторождений;

б) в пределах открытых районов платформ и плит, занимающих 27% территории СССР, доля труднооткрываемых месторождений поднимается до 90%;

в) в пределах закрытых районов, занимающих 35% территории СССР, труднооткрываемые месторождения составляют все 100% (сюда, естественно, не относятся месторождения, залегающие в самих четвертичных и других перекрытых молодых отложениях).

Из этих данных, предполагая, что указанные региональные геологические структуры обладают примерно равной продуктивностью зоны эксплуатации, можно подсчитать, что на долю труднооткрываемых месторождений приходится око-

ло 86% от общего числа всех месторождений. Соответственно доля легкооткрываемых месторождений составляет лишь около 14%, т. е. она примерно в 6 раз меньше, чем число труднооткрываемых месторождений. Конечно, эти цифры являются ориентировочными и в дальнейшем, по мере выявления новых труднооткрываемых месторождений, будут все более уточняться. Однако основной вывод, который вытекает из этих рассуждений — вывод о том, что остающийся в недрах резервный фонд труднооткрываемых рудных месторождений значительно превосходит запасы легкооткрываемых месторождений — безусловно, останется в силе. Отсюда вытекает важность разработки всех тех методов, которые позволяют с минимальными затратами выявлять труднооткрываемые месторождения — основной фонд минеральных месторождений ближайшего будущего.

Все сказанное о рудных месторождениях не в меньшей мере относится и к нерудным полезным ископаемым. Достаточно упомянуть месторождения нефти и каменного угля: почти все их месторождения, выявленные в последние годы, залегают на той или иной глубине от поверхности и по существу относятся к категории месторождений, которые прямыми визуальными методами не могут быть обнаружены.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых следует применять в комплексе с геологическими и геофизическими методами; все они взаимно дополняют друг друга и вместе позволяют решать такие практические задачи, которые каждый из них в отдельности решить не может. В разных конкретных условиях по-разному проявляется роль отдельных методов; если раньше поиски осуществлялись по преимуществу визуальными геологическими приемами, то сейчас все большую роль начинают играть геофизические и геохимические методы. Одновременно возрастает роль технических приемов поисков, особенно буровых работ; если раньше они применялись главным образом в стадии детальных поисков и разведки месторождений, то теперь, когда приходится проводить поиски и в закрытых районах, без них обойтись становится невозможным уже на всех стадиях поисковых работ; в частности, без буровых работ обычно невозможно выявление погребенных ореолов рассеяния элементов. Необходимость широкого применения при поисках месторождений горно-буровых работ сильно удорожает сами поиски; поэтому особо важное значение приобретает дальнейшее совершенствование всех поисковых методов, в том

числе геохимических, с целью сделать практические рекомендации наиболее обоснованными.

Геохимические методы являются наиболее новыми среди всех других, поэтому многие вопросы их теории и практики пока еще не достаточно разработаны, но они привлекли к себе уже серьезное внимание. Иллюстрацией этого может служить хотя бы та большая литература, которая появилась за последние годы у нас и в других странах. Часть этой литературы приводится мной; она будет полезна всем, кто захочет более углубленно познакомиться с современным состоянием геохимических методов поисков.

Л и т е р а т у р а

Белякова Е. Е., Резников А. А., Краморенко Л. Е., Нечаева А. А., Кронидова Т. Ф. Гидрохимический метод поисков рудных месторождений. Госгеолтехиздат, М., 1962.

Бродский А. А. Гидрохимический метод поисков рудных месторождений. Госгеолтехиздат, М., 1957.

Вернадский В. И. Избранные труды, тт. 1—6. Изд-во АН СССР, М., 1954—1960.

Викторов С. В. Использование геоботанического метода при геологических и гидрогеологических исследованиях. Изд-во АН СССР, М., 1955.

Виноградов А. П. Поиски рудных месторождений по растениям и почвам. Тр. Биогеохимич. лаб., т. 10. Изд-во АН СССР, М., 1954.

Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. Изд-во АН СССР, М., 1957.

Геоботанические методы при геологических исследованиях. Сб. статей. Госгеолтехиздат, М., 1955.

Геологические результаты прикладной геохимии и геофизики. Международный геологический конгресс, 21 сессия. Докл. сов. геологов. Раздел I. Геохимия. Госгеолтехиздат, М., 1960.

Геохимические методы поисков рудных месторождений. Сб. переводных статей под ред. В. И. Смирнова. ИЛ, М., 1954.

Геохимические поиски рудных месторождений в СССР. Тр. Первого всес. сов. по геохим. методам поисков рудных месторождений под ред. В. И. Красникова. Госгеолтехиздат, М., 1957.

Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений. Тр. Совещания по геохимич. методам. Изд-во АН СССР, М., 1959.

Гинзбург И. И. Опыт разработки теоретических основ геохимических методов поисков руд цветных и редких металлов. Госгеолтехиздат, М., 1957.

Измененные околорудные породы и их поисковое значение. Сб. статей под ред. Н. Н. Курека. Госгеолтехиздат, М., 1954.

Инструкция по металлотметрической съемке. Госгеолтехиздат, М., 1957.

Карцев А. А., Табасаранский З. А., Суббота М. И., Могилевский Г. А. Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений. Госгеолтехиздат, М., 1954.

Ковда В. А., Славин П. С. Почвенно-геохимические показатели нефтеносности. Изд-во АН СССР, М., 1951.

- Красников В. И. Основы рациональной методики поисков рудных месторождений. Госгеолтехиздат, М., 1959.
- Доверинг Т. С. Околорудные изменения как поисковый признак. ИЛ, М., 1953.
- Малюга Д. П. О почвах и растениях как поисковом признаке на металлы. «Изв. АН СССР», сер. геол., 1947, № 3.
- Малюга Д. П. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. Изд-во АН СССР, М., 1963.
- Материалы совещания геологов Восточной Сибири и Дальнего Востока по методике геологосъемочных и поисковых работ. Изд-во Главвостокгеология, Чита, 1956.
- Материалы к Всесоюзному совещанию по разработке научных основ поисков слепых рудных тел. Госгеолтехиздат, М., 1958.
- Мелков В. Г., Пухальский Л. Ч. Поиски месторождений урана. Госгеолтехиздат, М., 1957.
- Мелков В. Г., Флоровская В. Н. Введение в люминисцентную битуминологию. Госгеолтехиздат, М., 1956.
- Могилевский Г. А. Микробиологический метод поисков газовых и нефтяных месторождений. Гостоптехиздат, М., 1953.
- Овчинников А. М. Основные принципы применения гидрогеологических критериев к поискам месторождений полезных ископаемых. Вопр. теоретич. и прикл. геологии. Сб. МГРИ, М., 1947.
- Озерова Н. А. Первичные ореолы рассеяния ртути. Тр. ИГЕМ. Вопр. геохимии, IV. Изд-во АН СССР, М., 1962.
- Перельман А. И. Геохимия ландшафта. Географгиз, М., 1961.
- Поликарпочкин В. В. и др. Геохимические поиски месторождений полиметаллов в Восточном Забайкалье по илам гидросети и водам. Гостоптехиздат, М., 1958.
- Полынов Б. Б. Избранные труды. Изд-во АН СССР, М., 1956.
- Поляров В. Э. Ртуть и сурьма. Оценка месторождений при поисках и разведках, вып. 15. Госгеолтехиздат, М., 1955.
- Рожкова Е. В., Серебрякова М. Б. Возможная роль сорбции в образовании ореолов рассеяния. «Советская геология», 1958, № 4.
- Сауков А. А. Геохимия ртути. Изд-во АН СССР, М., 1946.
- Сауков А. А. Геохимия. Госгеолтехиздат, М., 1951.
- Сафронов Н. И. К вопросу об ореолах рассеяния месторождений толезных ископаемых и их использовании при поисках и разведке. «Проблемы советской геологии», 1936, № 4.
- Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений (методическое пособие), ч. 1, 2, 3. Ротопринт ВИТР, 1962.
- Сергеев Е. А. Исследование вод как средство поисков полиметаллических месторождений. «Разведка недр», 1946, № 2.
- Смирнов В. И. Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. Изд-во МГУ, 1954.
- Смирнов С. С. Зона окисления сульфидных месторождений. ОНТИ, М., 1936.
- Соколов В. А. Прямые геохимические методы поисков нефти. Госоптехиздат, М., 1947.
- Соколов В. А. Миграция газа и нефти. Изд-во АН СССР, М., 1956.
- Соколов В. А., Григорьев Г. Г. Методика и результаты газовых геохимических нефтегазопоисковых работ. Гостоптехиздат, М., 1962.
- Соловов А. П. Основы теории и практики металлометрических съюок. Изд-во АН КазССР, Алма-Ата, 1959.
- Токарев А. Н., Щербаков А. В. Радиогидрогеология. Госгеолтехиздат, М., 1956.

Федорчук В. П., Никифоров Н. А. Об использовании надрудного пирита в качестве индикатора при поисках низкотемпературных месторождений закрытого типа. «Разведка и охрана недр», 1958, № 5.

Ферсман А. Е. Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых. Изд-во АН СССР, М., 1940.

Фурсов В. З. Ореолы рассеяния ртути как поисковый признак на свинцово-цинковом месторождении Ачисай. «Геохимия», 1958, № 3.

Шарков Ю. В., Глико О. А. Геохимические методы поисков рудных месторождений в зарубежных странах. «Разведка и охрана недр», 1956, № 8.

Янишевский Е. М., Григорян С. В., Баранов Э. Н., Вертепов Г. И., Каблуков А. Д. Эндогенные ореолы рассеяния некоторых гидротермальных месторождений. Госгеолтехиздат, М., 1963.

Ahrens L. N. Lognormal distribution of the elements. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 5—6, 1954.

Boyle R. W., Koehler G. F. Heavy metal (Zn, Cu, Pb) content of water and sediment in the streams, rivers and lakes of southwestern Nova Scotia. *Canada Geol. Survey Paper* 58—1, 1958.

Cooper J. R., Huff L. C. Geological investigations and geochemical prospecting experiment at Johnson, Arizona. *Econ. Geology*, vol. 46, 1951.

Hawkes H. E. Principles of geochemical prospecting U. S. Geol. Survey Bull, 1000-F, 1957.

Hawkes H. E., Webb J. S. *Geochemistry in Mineral Exploration*. Harpers Geoscience Series, New York, 1962.

Huff L. C. Abnormal copper, lead and zinc content of soil near metaliferous veins. *Econ. Geology*, vol. 47, 1952.

Lovering T. S., Sokoloff V. P., Morris H. T. Heavy metals in altered rock over blind ore bodies. *Econ. Geology*, vol. 43, 1948.

Millman A. P. Biogeochemical investigation in areas of copper-tin mineralisation in Southwest England. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 12, 1957.

Tooms J. S., Webb J. S. Geochemical prospecting investigations in the Northern Rhodesian Copperbelt. *Econ. Geology*, vol. 56, 1961.

Webb J. S. A review of American progress in geochemical prospecting. *Inst. Mining Metallurgy Trans*, vol. 62, 1953.

Webb J. S. Observations on geochemical exploration in tropical terrains *Int. Geology Cong., XX Session*, 1958.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Из истории разработки теоретических основ и практического применения геохимических методов поисков	10
Глава 2. Методы анализа, применяемые при геохимических поисках	17
Глава 3. Теоретические основы геохимических методов поисков	26
Поисковые критерии и поисковые признаки	26
Геохимические индикаторы	28
Парагенезисы элементов и их причины	30
Геохимические провинции и эпохи	45
Ореолы и потоки рассеяния элементов	61
Глава 4. Металлометрические (литохимические) съемки	83
Металлометрические поиски по открытым ореолам рассеяния в делювиально-элювиальных отложениях	84
Металлометрические поиски по потокам рассеяния в аллювиальных отложениях (метод донных отложений)	102
Металлометрические поиски по погребенным ореолам рассеяния	103
Поиски по ореолам рассеяния в коренных породах	106
Практика металлометрической съемки	115
Глава 5. Гидрогеохимические методы поисков	124
Поиски сульфидных месторождений гидрогеохимическим методом	129
Области применения гидрогеохимического метода	146
Роль растворов в формировании литохимических ореолов	152
Почвенно-гидрохимический метод поисков	155
Глава 6. Газовые (атмохимические) методы поисков	157
Методика газовой съемки при поисках нефтяных и газовых залежей	173
Газовая съемка при поисках радиоактивных руд	175
Глава 7. Биогеохимические методы поисков	181
Собственно биогеохимический метод	183
Геоботанический метод	200
Глава 8. Геохимические методы поисков нефтяных месторождений	205
Битумные методы	206
Почвенно-геохимические методы	212
Гидрогеохимические методы	213
Микробиологические методы	221
Радиометрические методы	227
Глава 9. Другие геохимические методы поисков	229
Использование изотопного состава элементов для поисков их руд	229
Нейтронный каротаж	233
Глава 10. Природные условия проведения геохимических поисковых работ	237
Литература	245