

В. Л. БАРСУКОВ
С. В. ГРИГОРЯН
Л. Н. ОВЧИННИКОВ

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
ПОИСКОВ
РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ
ИМ. В. И. ВЕРНАДСКОГО

ИНСТИТУТ МИНЕРАЛОГИИ, ГЕОХИМИИ И КРИСТАЛЛОХИМИИ
РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В. Л. БАРСУКОВ, С. В. ГРИГОРЯН,
Л. Н. ОВЧИННИКОВ

3481
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
ПОИСКОВ
РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1981



Барсуков В. Л., Григорян С. В., Овчинников Л. Н.
Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.:
Наука, 1981.

В монографии рассмотрены научные и методические основы геохимических поисков различных по составу и условиям формирования рудных месторождений, при этом наиболее подробно — вопросы использования геохимических методов при поисках глубокозалегающих месторождений, как слепых, так и погребенных. Проанализированы также методы поисков по вторичным литохимическим, водным, газовым и биогеохимическим ореолам рассеяния элементов-индикаторов, а также вопросы рационального комплексирования геохимических методов на различных этапах и стадиях геологоразведочных работ применительно к различным металлогеническим и ландшафтно-геохимическим условиям.
Табл. 35 Илл. 170. Библ. назв. 106.

Ответственный редактор

Чл.-корр. АН СССР Н. П. ЛАВЕРОВ

© Издательство «Наука» 1981 г.

Геохимические методы уже прочно вошли в общий комплекс геологоразведочных работ на рудные полезные ископаемые и успешно применяются при поисках и разведке месторождений различных типов. В настоящее время геохимические методы переживают бурное развитие: постоянно совершенствуются их научные и методические основы, возникают новые модификации геохимических методов, пересматриваются возможности и расширяются сферы практического применения существующих. Наиболее значительным достижением теории и практики геохимических поисков рудных месторождений безусловно является резкое увеличение глубинности геохимических поисков, что выдвинуло геохимические методы в разряд ведущих при поисках разнообразнейших типов скрытых глубокозалегающих месторождений.

Важнейшей предпосылкой увеличения глубинности геохимических поисков явились успехи, достигнутые в последние годы в изучении и практическом применении первичных геохимических ореолов — эффективных признаков слепого оруденения. Методической основой геохимических поисков месторождений полезных ископаемых, как известно, является использование в качестве индикаторов оруденения различных типов геохимических аномалий. Среди этих аномалий первичные ореолы занимают особое положение: они ближе всего стоят к рудным телам и по существу являются первоисточником остальных типов геохимических ореолов, в частности, обширной группы гипергенных ореолов. Именно поэтому задача оценки любой из гипергенных аномалий в конечном счете сводится к установлению по возможности достоверного облика первичных ореолов — первоисточника данной аномалии, ибо переход от аномалии к рудному телу (месторождению) обязательно лежит через первичные ореолы. Это означает, что первичные ореолы являются основой интерпретации и последующей оценки любой геохимической аномалии. Исключительная важность всестороннего изучения первичных ореолов определяется также актуальностью разработки эффективных критериев интерпретации геохимических аномалий. Сущность геохимических поисков месторождений полезных ископаемых, как известно, сводится к решению задач обнаружения и интерпретации аномалий. Современный арсенал методических средств позволяет наиболее удовлетворительно решать первую задачу. Методика интерпретации геохимических аномалий является более сложной и менее разработанной. Это обстоятельство резко снижает эффектив-

ность геохимических поисков: в качестве прямого следствия создавшегося положения можно указать на огромное число выявленных в разных рудных районах геохимических аномалий с неясными перспективами. Очевидно, что надежная оценка перспектив рудоносности уже выявленных геохимических аномалий позволит обеспечить значительный прирост запасов минерального сырья.

Анализ современного состояния методики интерпретации и оценки геохимических аномалий показывает, что наиболее сложной является оценка перспектив рудоносности на глубину минерализованных зон, развитых в коренных рудоносных породах. Обнаружение этих зон с помощью геохимических методов, как уже отмечалось, особых трудностей не представляет. Как показывает опыт ведения геохимических поисков в разнообразнейших ландшафтно-геохимических условиях, опасность отнесения в разряд перспективных так называемых безрудных аномалий явно преувеличена. Безрудные аномалии, представленные породными аномалиями, накоплениями элементов на различных геохимических барьерах в процессе гипергенной миграции химических элементов и некоторыми другими типами легко идентифицируются и исключаются из сферы последующих детальных работ. Таким образом, мы приходим к выводу, что дальнейшее повышение эффективности геохимических поисков возможно при условии разработки и внедрения в практику поисковых работ более надежных критериев оценки на глубину зон минерализации в коренных породах, выявленных в результате геохимического опробования. Очевидно, что успешное решение этой задачи и вероятно только при условии детального изучения особенностей распределения элементов-индикаторов в коренных рудовмещающих породах, т. е. геохимических особенностей первичных ореолов. В связи с изложенным в книге основное внимание уделено рассмотрению особенностей состава и строения первичных геохимических ореолов различных по составу и условиям формирования месторождений.

Будучи неотъемлемой составной частью месторождений, первичные ореолы своими особенностями отражают специфические для данного месторождения (или данной генетической группы месторождений) условия локализации оруденения и могут быть использованы не только при поисках, но и для получения дополнительной информации о генезисе месторождений. Этому новому и недостаточно освещенному в литературе вопросу посвящена специальная глава книги.

Главы I и II написаны С. В. Григоряном, глава III — В. Л. Барсуковым и С. В. Григоряном, глава V — С. В. Григоряном и Л. Н. Овчинниковым, глава IV написана авторами совместно. Авторы выражают благодарность А. Г. Волосову, Л. Н. Жуковой, Г. И. Захарычевой и В. И. Морозову за помощь при подготовке рукописи книги.

ВВЕДЕНИЕ

Геохимические методы поисков рудных месторождений впервые были разработаны и применены на практике в СССР в тридцатых годах. Научный приоритет в создании этих методов и их практическом применении принадлежит Советскому Союзу и признается за рубежом. Так, Х. Е. Хокс и Дж. С. Уэбб — крупнейшие зарубежные ученые в области прикладной геохимии — в предисловии к русскому изданию своей известной и переведенной на многие языки монографии «Геохимические методы поисков минеральных месторождений» указывают: «Ранние теоретические исследования Ферсмана, Гольдшмидта и Вернадского легли в основу геохимических методов поисков минерального сырья, впервые разработанных и примененных советскими геологами более 30 лет назад, в годы, непосредственно предшествовавшие второй мировой войне. Статьи советских авторов, касающиеся этих ранних работ, явились первыми источниками, на основе которых проводились первые исследования в области геохимических методов поисков Геологической службы США в 1947 г. и Горно-геологического отдела Королевского горнотехнического училища в Лондоне в 1947 г.». Успехи в применении геохимических методов при поисках и разведке рудных месторождений обусловлены разработкой их научных основ по следующим основным направлениям:

— исследование вторичных геохимических ореолов рассеяния элементов-индикаторов с целью разработки методов выделения перспективных участков (мелкомасштабные поиски) и поиски в их пределах рудных тел и месторождений, обычно вскрытых эрозионной поверхностью (крупномасштабные поиски по вторичным литохимическим ореолам рассеяния элементов-индикаторов).

— изучение первичных геохимических ореолов для разработки методики поисков слепых и слабо эродированных рудных тел и месторождений;

— изучение наложенных эпигенетических ореолов рассеяния элементов-индикаторов с целью разработки методики поисков погребенных рудных тел и месторождений;

— разработка методов определения масштаба оруденения, исходя из параметров геохимических аномалий.

Эти направления работ могут быть выделены в такой же последовательности, как различные этапы развития геохимических работ в хронологическом порядке, когда с помощью геохимических методов решались все более сложные задачи поисковых работ. В настоящее время геохимические методы успешно

применяются на всех стадиях геологоразведочного процесса. Начиная с 1935 г. результаты исследований основоположника литохимических методов поисков рудных месторождений Н. И. Сафронова и его многочисленных последователей привели к созданию научно обоснованных методов геохимических поисков, широко используемых в процессе геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые. Следует особо отметить огромный вклад А. П. Соловова, Е. А. Сергеева и С. Д. Миллера в разработку и внедрение в практику геохимических методов поисков.

Широкий размах внедрения в практику геологоразведочных работ геохимических методов привел к открытию более 100 рудных месторождений в различных районах страны: полиметаллических — Узунжал, Шалкия, Кужалы, Бестюбе, Жайрем, Ушкатын, медных — Кусмурун, Авангард (Казахская ССР), оловорудного месторождения Арсеньевское (Приморье) и многих других. Значительные средства сэкономлены за счет уточнения направления разведочных работ с помощью геохимических методов и особенно за счет исключения излишних затрат на разведку объектов, бесперспективность которых была доказана с помощью геохимических методов. Только в Рудном Карамазаре (Средняя Азия) по результатам геохимических работ была предотвращена дорогостоящая разведка более 100 участков.

Методика геохимических поисков рудных месторождений продолжает непрерывно развиваться и совершенствоваться. Бурное развитие прикладной геохимии обуславливает актуальность работ, обобщающих состояние исследований по разработке научных и методических основ геохимических поисков. Современный период характеризуется интенсивной разработкой и внедрением в практику геохимических методов поисков глубоко залегающих рудных тел и месторождений, как слепых, так и погребенных под чехлом молодых осадков.

Учитывая чрезвычайную актуальность, а также исключительную сложность разработки научных основ геохимических методов поисков глубоко залегающих рудных тел и месторождений, в настоящей работе авторы основное внимание уделили описанию особенностей развития первичных геохимических ореолов эффективных признаков глубоко залегающих месторождений. Группы вторичных ореолов различных типов в работе рассмотрены как экзогенные производные первичных ореолов. В этой связи в работе уделено большое внимание вопросам корреляции первичных и вторичных ореолов, имеющим важное практическое значение в связи с возможностью повышения надежности оценки вторичных ореолов, благодаря учету особенностей первичных ореолов.

Следует также отметить работы М. А. Глазовской, А. Н. Еремеева, Е. М. Квятковского, А. И. Перельмана, В. В. Поликарпочкина, Н. Н. Сочеванова, Ю. В. Шаркова, В. З. Фурсова и др., имеющие важное значение для успешного развития исследова-

ний в области теории и практики геохимических поисков. В последние годы и за рубежом проявляется большой интерес к разработанной в СССР методике поисков рудных месторождений по первичным ореолам. Упомянутый выше известный американский ученый в области теории и практики геохимических поисков Х. Е. Хокс в рецензии на изданную в 1977 г. в США книгу А. А. Беуса и С. В. Григоряна «Геохимические методы поисков месторождений твердых полезных ископаемых», в частности, отмечает, что наиболее важным новшеством для зарубежных специалистов является геохимическая зональность первичных ореолов, использование которой может привести ко многим новым открытиям [99].

Исследованиями авторов установлено, что результаты выполняемого при геохимических поисках массового отбора и анализа геохимических проб имеют не только поисковое (поиски рудных тел), но и определенное генетическое значение. Геохимические аномалии и прежде всего первичные ореолы, будучи составной частью месторождений, несут в себе определенные черты, обусловленные генетическими особенностями данного типа оруденения. Этот вопрос в работе рассмотрен в самостоятельной главе.

ПЕРВИЧНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Все рудные месторождения сопровождаются первичными геохимическими аномалиями, представляющими собой участки рудовмещающих пород с аномальными содержаниями (повышенными или пониженными в сравнении с фоном) характерных для данного типа оруденения химических элементов. В методическом отношении целесообразно деление всей совокупности рудогенных (обусловленных процессами рудообразования) аномалий на две группы. К первой группе мы относим аномалии, представленные окаймляющими рудные тела (концентрированное, имеющее промышленное значение оруденение) первичными геохимическими ореолами химических элементов, а ко второй группе — геохимические аномалии, представленные зонами рассеянной рудной минерализации, не содержащими концентрированного оруденения. Если на стадии региональных (мелкомасштабных) поисковых работ все рудогенные аномалии, в том числе и зоны рассеянной минерализации, являются признаками месторождений, то на стадии локальных поисков надежными признаками промышленного оруденения могут служить только первичные ореолы промышленного оруденения. На стадии детальных работ поисковое значение геохимических аномалий, представленных зонами рассеянной минерализации, резко обесценивается. Пользуясь широким распространением в пределах рудных полей и месторождений, зоны рассеянной минерализации на стадии детальных поисков являются серьезной помехой для успешного ведения геохимических работ, в связи с чем ниже наряду с первичными ореолами будут рассмотрены также геохимические особенности развития зон рассеянной рудной минерализации, а также геохимические критерии идентификации этих групп геохимических аномалий.

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ

Первичный геохимический ореол химического элемента представляет собой околорудное пространство, обогащенное или обедненное этим элементом в результате его привноса или перераспределения (выноса) в процессе рудообразования. Известно, что вокруг рудных тел обычно устанавливаются аномальные по сравнению с фоном концентрации многих элементов. Применительно к ним правильнее использовать термин первич-

ные ореолы, обозначающий совокупность ореолов всех элементов или же группы их.

Как отмечалось, вокруг рудных тел и месторождений формируются ореолы как привноса, так и выноса химических элементов. В настоящее время ореолы привноса химических элементов изучены более детально. Они, по сравнению с ореолами выноса, как правило, обладают большими размерами и, следовательно, являются более важными в поисковом отношении. Большое практическое значение ореолов привноса определяется еще и тем, что они образуются одновременно с рудными элементами, типоморфными для рудных тел, и являются тем самым прямыми индикаторами последних, тогда как вынос элементов мог произойти как в собственно рудную стадию, так и в процессе дорудной или послерудной проработки вмещающих пород. В настоящее время отсутствуют надежные критерии определения связи ореолов выноса химических элементов с рудными телами, что, естественно, ограничивает диапазон их практического применения. Кроме того, ореолы выноса изучены крайне слабо и это не позволяет определить в настоящее время конкретные аспекты их практического применения. Одна из основных причин слабой изученности ореолов выноса химических элементов заключается в недостаточной для изучения ореолов выноса чувствительности наиболее широко используемых при геохимических поисках экспрессных методов анализа на многие химические элементы: при изучении ореолов выноса порог чувствительности анализа на тот или иной элемент должен быть на порядок и более ниже его фонового содержания. В отличие от этого, как известно, ореолы привноса могут быть удовлетворительно оконтурены при пороговом значении, равном минимально-аномальному содержанию исследуемого элемента. В связи с изложенным ниже в основном рассматриваются особенности строения и вопросы практического применения ореолов привноса. В дальнейшем для удобства изложения под термином «первичный ореол» мы будем подразумевать ореол привноса.

При геохимических поисках, как известно, в качестве основного аналитического метода используется экспрессный эмиссионный спектральный анализ геохимических проб. Этот метод, обладая достаточной для геохимических целей чувствительностью, является высокопроизводительным прежде всего благодаря возможности одновременного определения в анализируемых пробах широкого круга химических элементов (более 40). В связи с этим ниже при описании особенностей состава и строения первичных геохимических ореолов уделяется значительное внимание элементам, содержание которых удовлетворительно определяется экспрессным спектральным анализом.

МАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Медно-никелевые месторождения

Особенности первичных геохимических ореолов медно-никелевого оруденения рассматриваются на примере месторождений Печенги на Кольском полуострове и Норильского района.

Печенга. В породах, вмещающих рудоносные интрузивы и рудные тела Печенгской рудной зоны отчетливо устанавливаются аномальные концентрации никеля, меди, кобальта, хрома, серебра, свинца, цинка, бария, олова, молибдена, титана, ванадия, бора, марганца и ряда других элементов. Зоны повышенных содержаний химических элементов во вмещающих породах носят линейный характер, распространяясь по восстанию рудоконтролирующих зон в виде серии полос над рудными телами и рудоносными интрузивами или параллельно их контактам. В качестве примера описываются геохимические особенности сложно построенной рудоносной зоны месторождения Семилетка. Описываемая зона имеет пологое залегание и вскрыта рядом буровых скважин глубиной до 627 м (рис. 1). В пределах зоны развито четыре довольно крупных интрузивных тела, несущих медно-никелевое оруденение. Все они имеют линзовидную форму и вытянуты по падению зоны. Наиболее крупное интрузивное тело (*III*), мощность которого достигает 180 м, по падению зоны прослежено более чем на 1000 м. Интрузия сложена тремя разновидностями пород. Верхний дифференциат представлен габбро, средний — пироксенитами и нижний — перидотитами. Среди последних, характеризующихся относительно повышенными содержаниями никеля и меди, прослеживается зона, более насыщенная вкрапленностью минералов меди и никеля, в связи с чем среднее содержание основных рудных компонентов в ней достигает промышленного. Над этим крупным интрузивным телом, на незначительном расстоянии от него расположено другое интрузивное тело (*II*) линзовидной формы, представленное интенсивно серпентинизированными ультраосновными породами с более богатым прожилково-вкрапленным оруденением. Оруденелые интрузивные тела такого же типа залегают близ выхода зоны на эрозионную поверхность (*I*). В последних устанавливаются также тела массивных и брекчиевых руд, имеющие значительно меньшую мощность и протяженность по описываемому разрезу. Кроме этих рудоносных интрузий, скв. 1086 и 1127 вскрыты два мелких рудных тела с массивным медно-никелевым оруденением. Одно из них залегает в филлитах, а другое — в перидотитах. Наличие в рудовмещающей зоне группы сближенных в пространстве рудных тел разного типа и размера весьма затруднило изучение особенностей первичных ореолов каждого из рудных тел. В связи с этим в основном исследованы поля аномальных концентраций элементов, образующиеся около группы рудных тел.

Как следует из рис. 1, аномальные концентрации никеля —

основного рудообразующего элемента — развиты в виде линейно-вытянутых часто сближенных субпараллельных полос. Мощность таких полос от нескольких метров до 30—40 м. Наблюдается увеличение их числа в верхней части рудовмещающей зоны, вблизи выхода ее на эрозионную поверхность. Полосы аномальных концентраций распространяются как в лежащем, так и висячем боках интрузий, а также и на удалении от рудных тел и рудоносных интрузий. В плоскости изученного, разреза за пределами рудовмещающей зоны, также выявляется несколько зон аномальных концентраций никеля. Они, как правило, приурочиваются к тектонически нарушенным и ослабленным зонам, в которых иногда залегают маломощные и малопротяженные интрузивные тела основных или ультраосновных пород. Зоны аномальных концентраций серебра окаймляют рудоносные образования и в виде маломощных сближенных полос распространяются над ними. Наблюдается увеличение числа таких зон в верхней части рудовмещающей зоны (рис. 2). Содержание серебра в пределах аномальных полос увеличивается в направлении восстания рудоносных зон. Аномальные концентрации остальных элементов (медь, свинец, кобальт, цинк, хром, титан, ванадий) также образуют линейно-вытянутые зоны. В пределах рудовмещающей зоны они фиксируются в виде малопротяженных и маломощных полос, местами приобретающих линзовидную форму. Таким образом, устанавливается преимущественно линейная форма аномальных зон элементов, обусловленная их приуроченностью к межслоевым разрывным нарушениям. Определяющее влияние разрывных нарушений на структуру геохимических аномалий установлено также в результате детального геолого-геохимического картирования на Котсельваарском карьере, где широко развиты разрывные нарушения нескольких направлений. Установлено, что в зонах практически всех разрывных нарушений вблизи рудных залежей фиксируются повышенные концентрации рудогенных элементов. Это обуславливает весьма сложную конфигурацию аномалий в зависимости от структурной обстановки, определяемой сочетанием разнонаправленных разрывных нарушений.

Анализ пространственного распределения элементов-индикаторов показывает, что поля повышенных концентраций во вмещающих породах ряда химических элементов тесно связаны с рудоносными интрузиями или рудными телами, в которых также элементы имеют высокие содержания. При этом содержания элементов уменьшаются по мере удаления от интрузива. К таким элементам относится никель, хром, кобальт, медь, серебро, свинец. Изучение участков аномальных содержаний указанных элементов во вмещающих интрузивы породах показывает, что в них, как правило, развиты сульфидная вкрапленность или кварц-карбонатные прожилки с сульфидами (халькопирит, пирротин, пентландит, пирит), т. е. те же минеральные формы, в которых элементы устанавливаются и в рудных телах. Эти

данные позволяют рассматривать выявленные аномальные поля в качестве первичных геохимических ореолов рудных тел, а элементы, их образующие, считать индикаторами медно-никелевого оруденения. С целью уточнения индикаторной роли отдельных элементов-индикаторов исследовалась зависимость состава ореолов от типов руд.

Медно-никелевые руды Печенгского рудного поля, как известно, разделяются на несколько типов — бедные вкрапленные в серпентинитах, богатые прожилково-вкрапленные, брекчиевидные и сплошные сульфидные руды. Изучение зональности первичных ореолов медно-никелевого оруденения месторождений Печенги крайне затруднено в связи с тем, что в пределах рудовмещающих зон обычно развито несколько рудных тел разного типа и размера, расположенных кулисообразно. При этом выявляются поля аномальных концентраций элементов около группы рудных тел и исследуется зональность геохимических аномалий, сопровождающих зону в целом. Несмотря на сложный характер развитых вокруг сближенных в пространстве кулисно расположенных рудных тел, удается установить определенные закономерно выдержанные смещения друг относительно друга аномальных полей отдельных элементов. Установлено, что первичные ореолы имеют зональное строение, которое выражается в постепенной смене областей относительного накопления элементов по падению рудоносных зон в следующей последовательности: барий — серебро — свинец — титан — цинк — ванадий, медь — никель — хром — кобальт. Определенно устанавливается группа элементов, характерных для надрудных сечений (барий, свинец, серебро, цинк) и группа элементов, образующих максимальные концентрации на уровне рудных залежей и ниже (никель, кобальт, хром, медь).

На рис. 3 по описываемому разрезу изображено изменение величины мультипликативного показателя, представляющего собой рассчитанное по каждой пробе частное от деления произведений содержаний надрудных элементов (серебро, свинец, барий, цинк) на произведение содержаний подрудных (никель,

Рис. 1. Первичные геохимические ореолы (5—6) и распределение серебра (в %) в интрузиях ультраосновного состава (1—4)

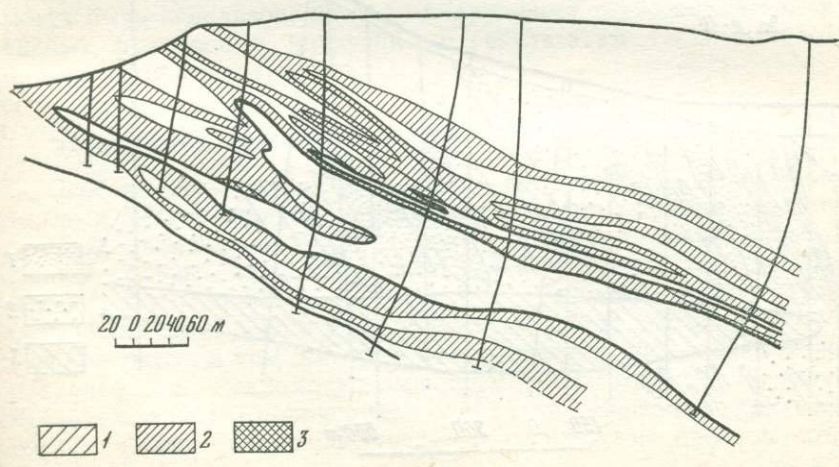
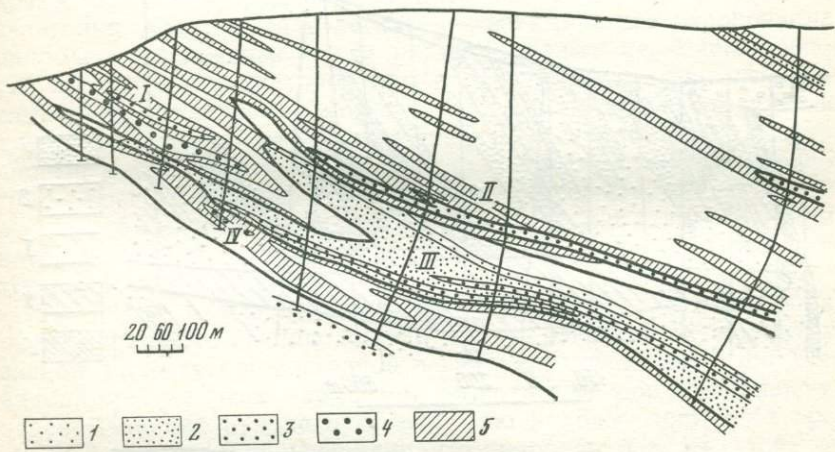
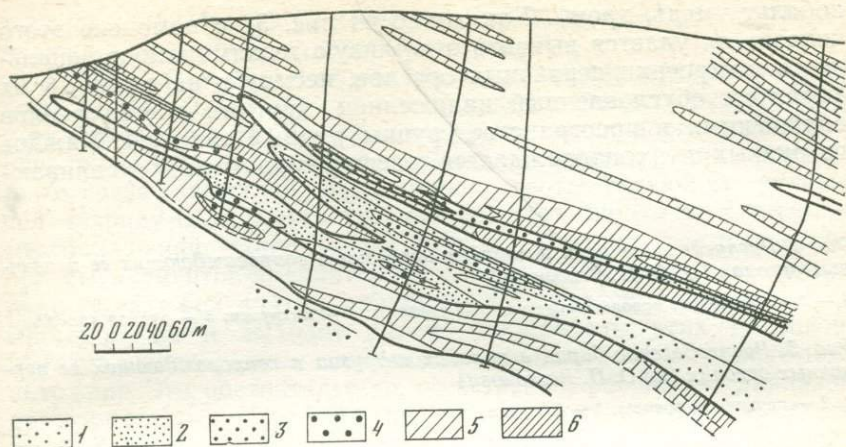
1 — 0,000005—0,0001; 2 — 0,00001—0,00003; 3 — 0,00003—0,0003; 4 — 0,0003—0,0015;
5 — 0,000005—0,00001; 6 — 0,00001—0,00002

Рис. 2. Первичные геохимические ореолы (5) и распределение никеля (в %) в интрузиях ультраосновного состава (1—4)

1 — 0,03—0,1; 2 — 0,1—0,3; 3 — 0,3—1; 4 — более 1; 5 — 0,0029—0,07

Рис. 3. Изменение по разрезу 55 величины мультипликативного показателя (Ag·Pb·Ba·Zn/Ni·Co·Cu·Cr)

Филлиты: 1 — $0,3 \cdot 10^{-3}$, 2 — $0,3 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10$, 3 — $0,1 \cdot 10$; диабазы: 1 — $0,2 \cdot 10^{-3}$, 2 — $0,2 \cdot 10^{-3} - 0,2$, 3 — 0,2



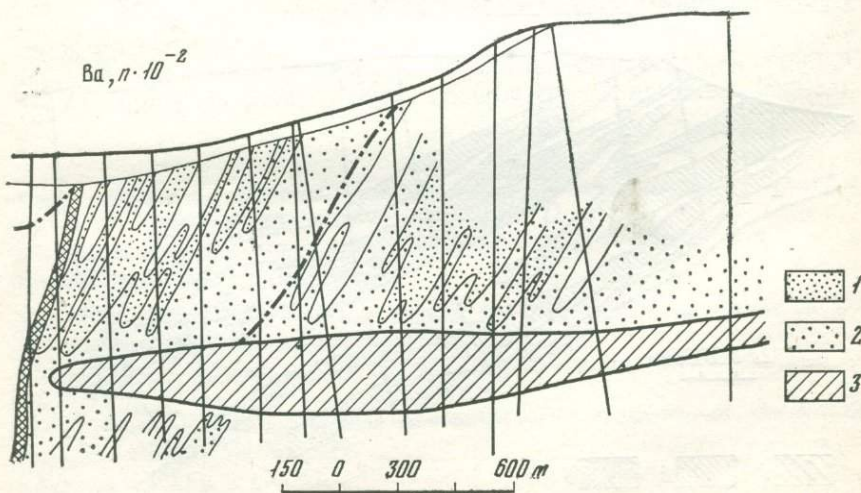
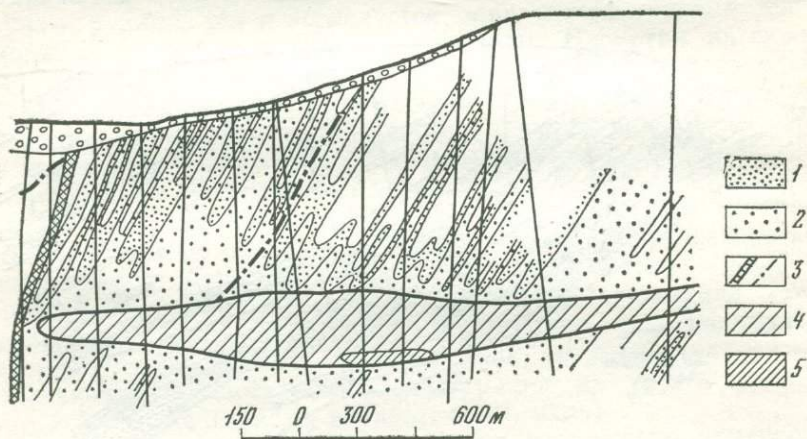
кобальт, медь, хром). Как видно из рис. 3, с помощью этого показателя удается выявить отчетливую геохимическую зональность в строении первичных ореолов, несмотря на сложный их характер, обусловленный наложением друг на друга ореолов сближенных в пространстве группы рудных залежей. Каждое из рудных тел сопровождается расширяющимися и усиливаю-

Рис 4. Распределение меди в породах интрузии и сопровождающих ее первичных ореолах (по О. П. Разгонову)

1 — 2 — первичные ореолы интрузии; 3 — разломы; 4 — интрузия; 5 — рудная залежь

Рис. 5. Распределение бария в породах интрузии и сопровождающих ее первичных ореолах (по О. П. Разгонову)

1, 2 — первичные ореолы; 3 — интрузия



щимися по восстанию оруденения ореолами, оконтуренными по величине мультипликативного показателя.

Выше рассмотрены особенности первичных ореолов, сопровождающих выходящие на эрозионную поверхность рудные тела и рудоносные ультраосновные интрузии. Зональность первичных ореолов может быть использована для оценки уровня эрозионного среза аномалий относительно соответствующих рудных тел. Наряду с этим, как установлено геохимическим изучением месторождений Норильской группы, широкие геохимические ореолы элементов-индикаторов развиваются не только вокруг рудных залежей внутри вмещающих оруденение интрузивных массивов, но и выходят далеко за пределы этих массивов, образуя своеобразные первичные ореолы вокруг рудоносных интрузий. Это обстоятельство, естественно, расширяет диапазон практического применения первичных ореолов, поскольку они могут быть использованы также в качестве эффективных поисковых признаков рудоносных интрузий в случае их слепого залегания. Как показало детальное геохимическое опробование, наиболее интенсивные части надинтрузивных первичных ореолов элементов-индикаторов обычно совпадают с зонами метасоматитов, мощность которых над Талнахской интрузией, в частности, достигает 200 м, в среднем составляя 60 м. За пределами метасоматитов ореолы носят ярко выраженный инфильтрационный характер и имеют более прерывистое строение: в них повышенные аномальные концентрации элементов-индикаторов обычно приурочены к узким зонам разнонаправленных тектонических нарушений.

На рис. 4 и 5 в вертикальном поперечном разрезе изображены первичные ореолы меди и бария, развитые в надинтрузивной части северо-восточной ветви Талнахской интрузии. Как видно, ореолы этих элементов на сотни метров «пробивают» перекрывающие рудоносную интрузию породы, достигают эрозионной поверхности. Очевидно, что подобные ореолы с успехом могут быть использованы для обнаружения глубокозалегающих слепых рудоносных интрузий по результатам геохимического опробования поверхности.

ПЕГМАТИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Особенности состава и строения первичных ореолов пегматитовых месторождений рассматриваются на примере редкометалльных пегматитов. Выбор этого типа пегматитов не случаен: редкометалльные пегматиты являются источником ряда важных элементов и вопросы повышения эффективности их поисков за счет включения в комплекс поисковых работ высокоэффективных методов, в том числе и геохимических, не теряют своей актуальности. Редкометалльные пегматиты относятся к числу месторождений, отличающихся слабой изученностью первичных геохимических ореолов. Изучение геохимических ореолов этого

типа оруденения начато сравнительно недавно, и имеющиеся в этой области работы с различной степенью детальности освещают различные вопросы формирования ореолов [12, 39, 43, 83]. Следует отметить, что в этих работах первичные геохимические ореолы редкометалльных пегматитов описываются, как правило, по результатам опробования коренных пород по единичным пересечениям через пегматитовые тела. Это обстоятельство, естественно, не позволяет выявить особенности объемного распределения элементов в их ореолах и, в частности, установить зональность ореолов, которая имеет как теоретическое, так и большое практическое значение. В связи с отмеченным первичные геохимические ореолы редкометалльных пегматитов рассматриваются на примере двух редкометалльных месторождений, детально изученных в результате опробования керна большого числа разведочных буровых скважин [33].

Редкометалльные пегматиты Украины. Редкометалльная зона сложена среднепротерозойской толщей сланцев, мета- и ультрабазитов, метаморфизованных в меньшей степени, чем метаморфические толщи остальной части массива. В разрезе этой площади развиты биотитовые, гранатовые, ставролитовые, амфиболитовые и хлоритовые сланцы, амфиболиты, ультрабазиты (пироксениты, тремолиты, актинолититы), гравелиты и конгломераты. Редкометалльные пегматиты и вмещающие их породы наиболее детально изучены в центральной части пегматитового поля. Первичные ореолы редкометалльных пегматитов на этом месторождении изучены на двух участках. На Западном участке редкометалльной зоны согласно залегающие амфиболитовые, тремолит-актинолитовые и другие разновидности сланцев, амфиболиты и ультрабазиты прорываются телами редкометалльных пегматитов. Последние слагают линзовидные и жилоподобные тела мощностью от нескольких десятков сантиметров до десятков метров и протяженностью сотни метров. Морфология тел и условия их залегания сложные. Установлены пегматиты как пологозалегающие, так и крутопадающие. Экзоконтактовые изменения в зальбандах пегматитовых тел выражены в интенсивном ослюдении ультрабазитов и в гольмквиститизации гранат-биотитовых, двуслюдяных сланцев, гнейсов и амфиболитов. Мощность зон гольмквиститизации колеблется от десятков сантиметров до 5—10 м. Непосредственно в экзоконтакте почти всегда прослеживается зона флогопитизации, сложенная цезийсодержащим флогопитом и биотитом и сноповидными агрегатами шерла и дравита. Во всех зонах отмечена редкометалльная минерализация, представленная тапиолитом, танталитом, колумбитом, бериллом, изумрудом, сподуменом, трифилином, амблигонит-монтебразитом, циртолитом, турмалином и др. Наибольшие концентрации тапиолита, танталита и колумбита отмечены в мусковит-альбитовых зонах.

В строении Восточного участка месторождения принимают участие породы, представленные слюдистыми кварцитами, раз-

нозернистыми песчаниками и гравелитами, мусковит-биотитовыми, гранат-биотитовыми и другими разновидностями сланцев. Породы имеют близкое к широтному простирание и крутое (70—80°) падение на юг. Южная часть участка сложена метаморфизованными ультрабазиитами. Изучение первичных геохимических ореолов проводилось на разведанном месторождении, пегматитовые тела и первичные ореолы которого вскрыты скважинами и горными выработками. Ореолы изучались по разрезам, ориентированным вкрест простирания пегматитовых тел. Исследованы первичные ореолы не только слепых, но и выходящих на эрозионную поверхность рудных тел. Ниже описываются первичные геохимические ореолы по одному из наиболее типичных разрезов месторождения.

Разрез 1—70. В данном разрезе вскрыто пегматитовое тело микроклин-альбитового состава со сподуменом, которое залегает в гранодиоритах, биотит-гранатовых, гранат-биотитовых и амфибол-гранат-биотитовых сланцах (рис. 6). Под основной жилой в нижней части разреза подсечены мелкие пегматитовые прожилки. При изучении первичных ореолов редкометалльных пегматитов наряду с экспрессным спектральным анализом использованы и некоторые специальные прецизионные методы для исследования особенностей распределения в околорудном пространстве ряда типоморфных для пегматитов, но «неудобных» для экспрессного спектрального анализа (неудовлетворительная чувствительность анализа) элементов. К числу этих элементов относятся редкие щелочи (литий, рубидий, цезий), бор, тантал и фтор. На рис. 6 изображены выявленные по данному разрезу ореолы ряда химических элементов, развитые в гранодиоритах и сланцах. Наиболее широкие ореолы образуют редкие щелочи: ширина ореола лития превышает мощность пегматитового тела в 3—8 раз. Рубидий и цезий образуют более узкие ореолы (см. рис. 6). В отличие от рубидия и цезия, которые концентрируются в пегматите, литий преимущественно концентрируется во вмещающих породах, где его содержание в 2—4 раза выше, чем в пегматите.

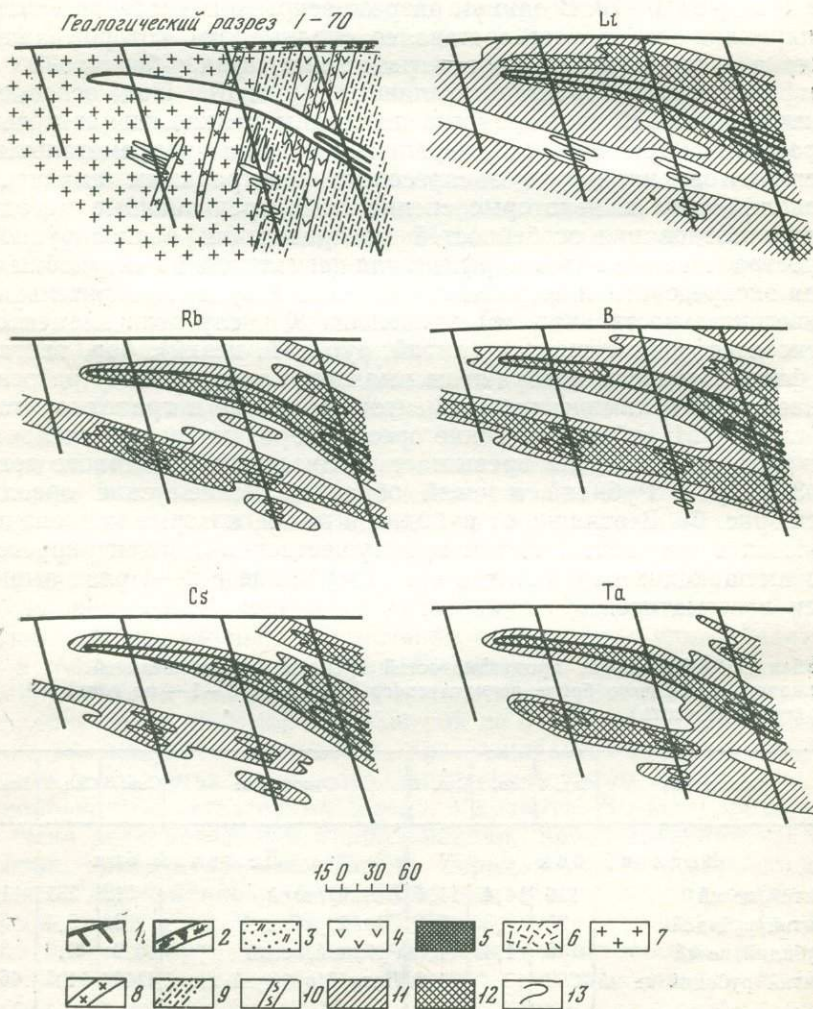
Таблица 1. Отношение продуктивностей ореолов редких щелочей лежачего и висячего боков пегматитового тела (скв. 3—1 — от головной к корневой части)

Отношение	Скв. 3			Отношение	Скв. 2		
	Скв. 3	Скв. 2	Скв. 1		Скв. 3	Скв. 2	Скв. 1
Висячий бок				Лежащий бок			
Литий/цезий	116	14,4	11,6	Литий/цезий	512	281	11,9
Литий/рубидий	23	3,3	7,5	Литий/рубидий	83	5,4	3,9
Рубидий/цезий	5	4,4	1,6	Рубидий/цезий	6,2	52,3	3,1
Литий ² /рубидий·цезий	2668	42	81,2	Литий ² /рубидий·цезий	42496	1405	46,5

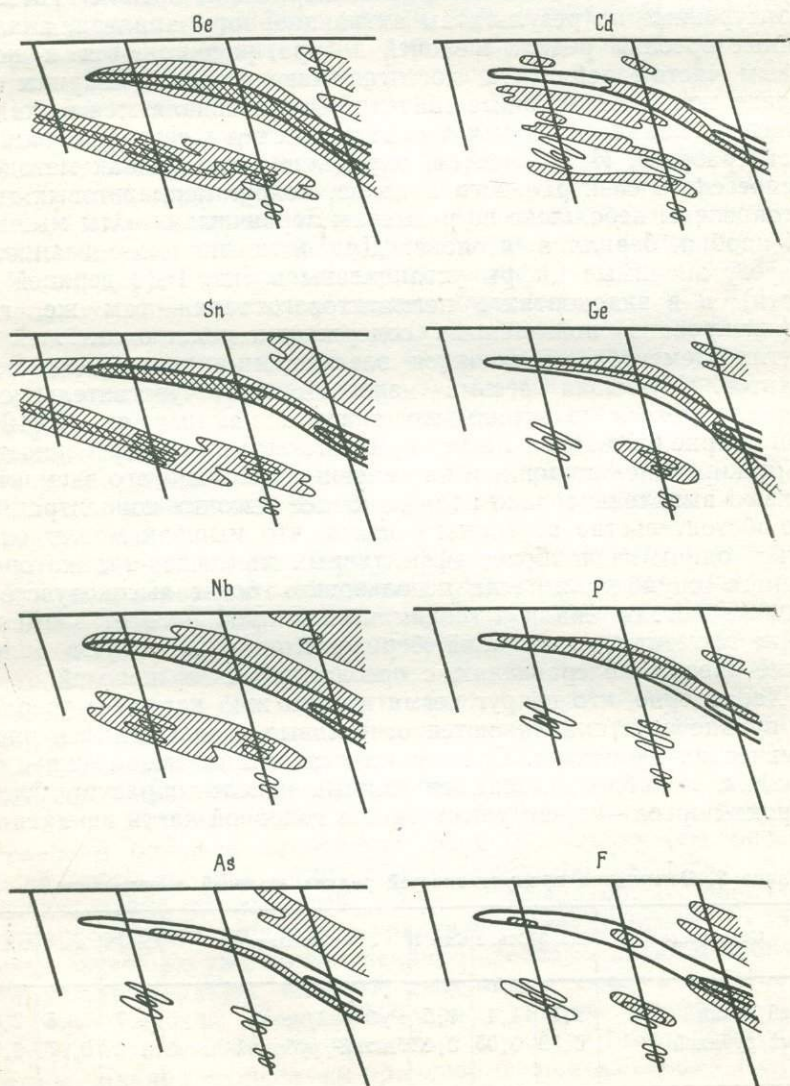
Как следует из табл. 1, парные отношения продуктивностей ореолов редких щелочей друг к другу закономерно уменьшаются в направлении к корневым частям пегматитовой жилы и ореолов. При этом наиболее контрастно меняется отношение литий²/рубидий·цезий, которое закономерно убывает от головных

Рис. 6. Первичные ореолы по разрезу 1—70

1 — буровые скважины; 2 — почвенно-растительный слой и суглинки; 3 — кварц-мусковитовый пегматит; 4 — кварц-альбит-микроклиновый пегматит; 5 — зоны блокового микроклина; 6 — зона сахаровидного альбита; 7 — гранодиориты разгнейсованные; 8 — амфиболиты; 9 — сланцы биотит-гранатовые, гранат-биотитовые, амфибол-биотит-гранатовые; 10 — оливин-серпентин-тремолитовые породы. Содержание (в %): 11, 12 — первичные ореолы; 13 — границы пегматитовых тел



частей ореолов к корневым. Некоторое увеличение данного отношения в висячем боку по скв. 1 позволило сделать вывод о том, что недалеко от скв. 1 залегает слепое пегматитовое тело, надрудные ореолы которого, накладываясь на ореолы висячего бока известного пегматита, столь своеобразно нарушают картину зональности. Впоследствии были открыты новые пегматитовые тела, что подтвердила правильность интерпретации результатов геохимического опробования керна буровых скважин. В отличие от этого, как уже отмечалось, лежащий бок характеризуется монотонным и весьма контрастным (около 1000 раз)



изменением величины рассмотренного индикаторного отношения. Примечательно, что в пегматитовом теле выдержанная зональность в распределении редких щелочей практически отсутствует (табл. 2). Эти данные показывают, что в отношении геохимической зональности первичные ореолы по сравнению с пегматитовыми телами являются более информативными.

Из остальных элементов бор также образует широкие ореолы, достигающие максимальной ширины (40 м) в скв. 1 (см. рис. 6). По своим параметрам ореол бора близок к ореолам редких щелочей: для него устанавливается усиление в направлении падения пегматитового тела. Первичные ореолы тантала, оконтуренные по результатам активационного анализа, аналогичные ореолам редких щелочей и бора, расширяются к корневым частям пегматита, достигая максимальной ширины на уровне скв. 1. Аномальные значения фтора появляются в скв. 1, фиксируя появление новых пегматитовых тел в северо-восточной части разреза. Из элементов, определяемых в пробах методом экспрессного спектрального анализа, вокруг пегматитовых тел, установлены небольшие по размерам первичные ореолы мышьяка, ниобия, бериллия и олова. Для мышьяка по описанному разрезу значимые цифры установлены в скв. 1 (в верхней ее части) и в эндоконтакте пегматитового тела — там же, где зафиксированы повышенные содержания редких щелочей и других элементов, являющихся элементами-индикаторами пегматитов. Учитывая весьма недостаточную чувствительность применявшегося спектрального анализа на мышьяк (0,010% (при кларке 0,0002%), следует признать, что в действительности возможны более широкие и интенсивные ореолы этого элемента, а нами выявлены только поля наиболее высоких концентраций. Это обстоятельство позволяет считать, что мышьяк может оказаться одним из наиболее эффективных элементов-индикаторов данного оруденения, если использовать более высокочувствительные методы анализа геохимических проб на этот элемент. Такие элементы, как ниобий, бериллий, олово образуют более узкие ореолы по сравнению с ореолами редких щелочей.

Характерно, что вокруг пегматитовых жил наряду с ореолами привноса устанавливаются отчетливые ореолы выноса ряда химических элементов. Ореолы выноса титана, меди, скандия, ванадия, молибдена являются узкими, никель образует более широкий ореол — преимущественно в головной части пегматита.

Таблица 2. Отношения продуктивностей редких щелочей в пегматите

Отношение	Скв. 3 Скв. 2 Скв. 1			Отношение]	Скв. 3 Скв. 2 Скв. 1		
Литий/цезий	2,7	1,4	1,5	Рубидий/цезий	4,7	29,5	3,3
Литий/рубидий	0,59	0,05	0,43	Литий ² /рубидий·цезий	1,6	0,07	0,6

Эти ореолы отличаются весьма небольшой контрастностью: в среднем коэффициент аномальности для них равен 0,5—0,25. При изучении поведения элементов в ореолах выноса намечается зональность, обусловленная различной степенью выноса химических элементов из различных уровней околопегматитового пространства. Такие элементы, как барий, стронций, свинец выносятся преимущественно из корневой части жилы, тогда как цинк, хром, медь, кобальт, цирконий и другие в основном выносятся из головной части ореолов (рис. 7).

Редкометалльные пегматиты Сибири. Осадочно-метаморфические породы района представлены кристаллическими сланцами: кварц-биотитовыми, кварц-гранат-биотитовыми, кварц-биотит-андалузитовыми, кварц-биотит-амфиболитовыми, кварц-амфиболовыми, метаморфизованными в условиях амфиболитовой и зеленокаменной фаций. Пегматиты в изученном районе широко распространены и характеризуются значительной протяженностью. Они представляют собой системы сближенных жил, группирующихся в жилные зоны, часто ветвятся, наблюдаются раздувы и пережимы. Со вмещающими породами пегматиты залегают согласно. Экзоконтактовые изменения вмещающих пород выражены в появлении биотита, турмалина, кварца, гольмквистита, мусковита, карбоната, цоизита и сульфидов. Большинство пегматитовых тел имеет сложное строение и характеризуется отсутствием четкой зональности, непостоянством развития структурно-минералогических комплексов, невыдержанностью их как по простиранию, так и по падению. Границы между комплексами четкие, но часто неровные. Известны следующие типы пегматитов: микроклин-сподуменовый, микроклин-альбитовый со сподуменом и поллцитом, альбит-сподуменовый.

Приведенный на рис. 8 разрез вскрывает группу пегматитовых жил, в основном сложенных двумя структурно-минералогическими комплексами: мелкозернистым или аплитовидным кварц-альбит-сподуменовым и средне- или крупнозернистым микроклин-альбит-сподуменовым. Жилы залегают преимущественно в кварц-биотитовых и биотит-амфиболовых сланцах, в милонитах и амфиболитах и характеризуются сложноветвящимся строением. Пегматитовые жилы пересекаются дайкой диабазов. Первичные ореолы лития, рубидия и цезия практически занимают всю площадь разреза, для цезия характерно несколько большее количество фоновых «окон» (см. рис. 8). Из-за того, что в данном разрезе наблюдается очень частое переслаивание пегматитовых жил с вмещающими породами, размеры ореолов определить практически невозможно. Но ореол цезия несколько уже по сравнению с ореолами лития и рубидия. Бор также образует широкое аномальное поле в отличие от других элементов (бериллий, олово, ниобий, фосфор, таллий и др.), которые образуют ореолы шириной не более нескольких метров. Наряду с ореолами привноса по описываемому разрезу

установлены ореолы выноса тех же элементов, что и на описанном выше месторождении Украины. Идентичным является не только элементный состав ореолов выноса, но и их зональность.

Мультипликативные ореолы. Как следует из рис. 6, ореолы вокруг слепого пологозалегающего пегматитового тела обычно также являются слепыми: они не достигают верхней границы коренных рудовмещающих пород. Очевидно, что использование подобных ореолов при поисках слепых тел затруд-

Рис. 7. Мультипликативные ореолы выноса элементов

1 — рудное тело; 2 — ореолы выноса; 3, 4 — поля фоновых концентраций

Рис. 8. Первичные ореолы пегматитовых тел

1 — диабазы (дайка); 2 — сланцы; 3 — милониты; 4 — амфиболиты; 6, 7 — первичные ореолы (7 — поля повышенных содержаний); 8 — пегматитовые тела

Рис. 9. Мультипликативные ореолы редких щелочей

Значения произведения содержаний: 1 — $3 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-8}$, 2 — $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6}$, 3 — более $1 \cdot 10^{-6}$

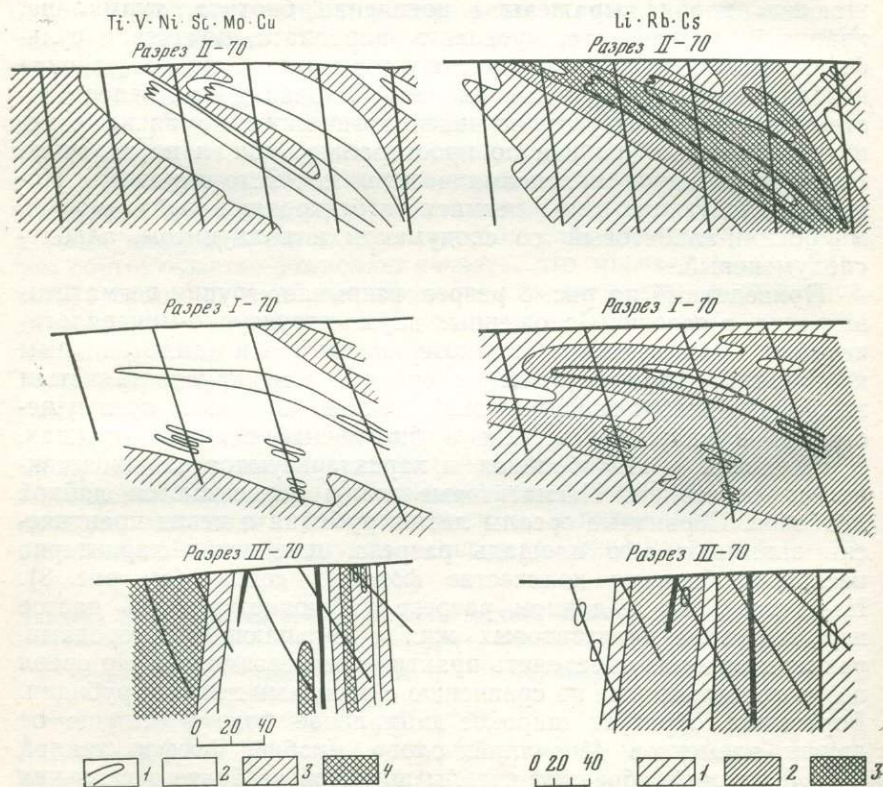


Рис. 7

Рис. 9

нительно, поскольку они не могут быть выявлены путем опробования коренных пород на поверхности (открытые районы) или же керна картировочных скважин при поисках в пределах площадей, перекрытых аллохтонными отложениями. С целью усиления этих ореолов был использован метод построения мультипликативных ореолов. Как следует из рис. 9, даже мелкие вертикальные пегматитовые жилы сопровождаются мощными и контрастными мультипликативными ореолами редких щелочей, выявленными при уровнях значимости 14,6% и 5% (двусторон-

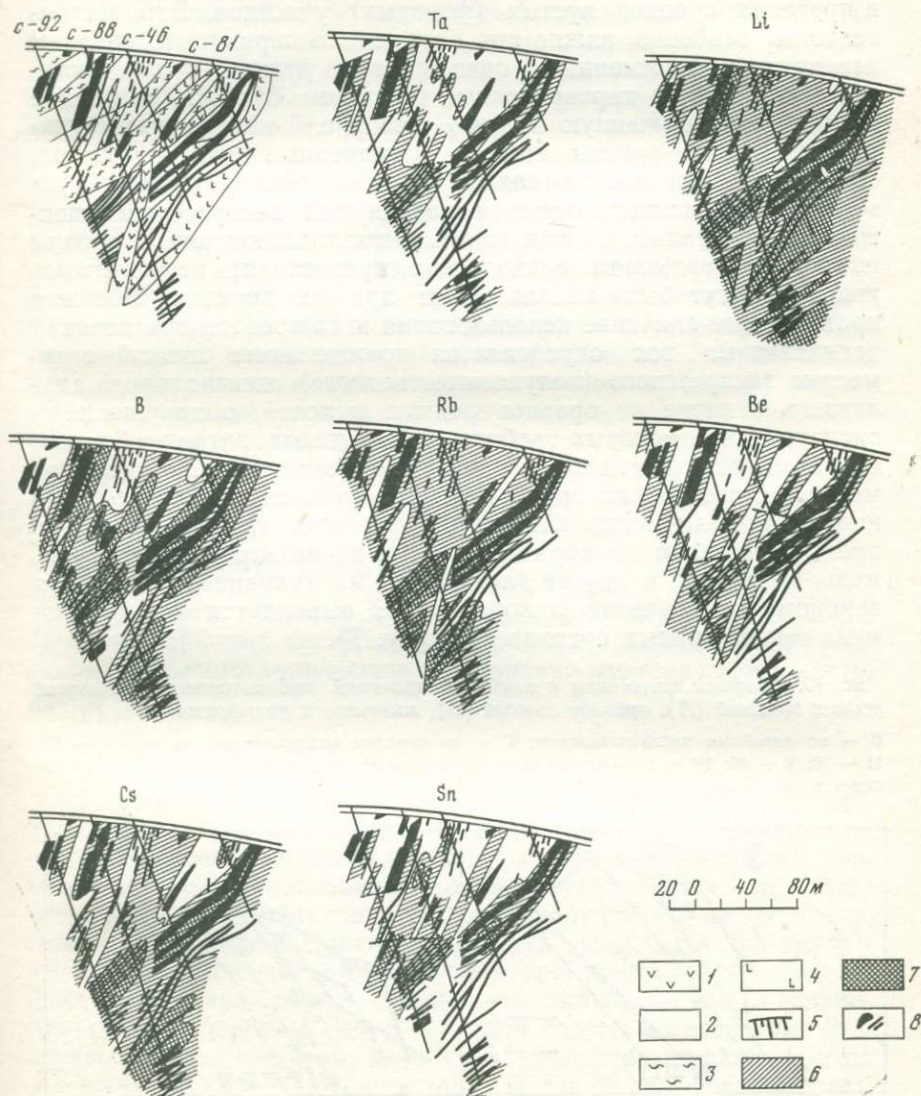
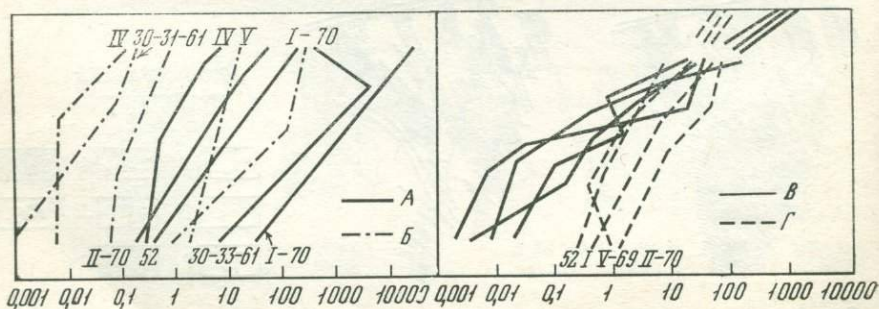


Рис. 8

ний). В случае с пологозалегающими скрытыми пегматитовыми телами мультипликативные ореолы редких щелочей достигают верхней границы рудовмещающих пород. Очевидно, что по сравнению с моноэлементными, использование мультипликативных ореолов при поисках слепых пегматитовых жил будет более эффективным. Наряду с более высокой контрастностью и значительными размерами, мультипликативные ореолы обладают еще одним существенным преимуществом, а именно: более равномерным распределением, практически полным отсутствием в пределах ореолов пустых (фоновых) участков. Это обстоятельство особенно важно при поисках по первичным ореолам перекрытых аллохтонными отложениями рудных тел и месторождений, когда картировочные скважины бурятся по редкой сети и на ограниченную глубину. На рис. 7 изображены мультипликативные ореолы выноса, построенные для элементов, содержания которых в геохимических пробах с удовлетворительной чувствительностью определяются экспрессным спектральным анализом. Как видно, мультипликативные ореолы выноса по размерам значительно превосходят пегматитовые жилы и могут быть использованы при их поисках. Большое практическое значение использования этих ореолов при поисках пегматитовых тел определяется прежде всего низкой стоимостью экспрессного (полуколичественного) спектрального анализа, в отличие от ореолов редких щелочей, обнаружение и оконтуривание которых требует значительных затрат, обусловленных дороговизной аналитических определений. Как уже отмечалось, в строении ореолов выноса устанавливается зональность: такие элементы как барий, стронций, свинец выносятся преимущественно из корневой части пегматитов; цинк, хром, медь, цирконий и другие элементы — из головной части. Эта закономерность четче и контрастнее выявляется в строении мультипликативных ореолов (см. рис. 7).

Рис. 10. Графики изменения с глубиной значений индикаторных отношений редких щелочей (А), ореолов выноса (Б), мышьяка и вольфрама (В и Г)

В — по линейным продуктивностям; Г — по средним содержаниям; разрезы I — 70; II — 70; V — 69; IV — Украинское пегматитовое поле; разрезы 52, I, 30-33-61 и др. — Сибирское месторождение



Зональность. Для графического изображения зонального строения первичных ореолов исследованных пегматитовых месторождений на рис. 10 приведены графики изменения с глубиной (по падению рудных тел) различных мультипликативных индикаторных отношений. Как видно из рис. 10, для редких щелочей и ореолов выноса выявляется зональность, единая только качественно: графики по отдельным разрезам резко растянуты по оси абсцисс, отражая значительные вариации значений на одинаковых уровнях. Диапазоны этих значений существенно перекрываются, что практически исключает возможность надежной оценки с помощью этих индикаторных отношений уровня аномалий относительно оруденения по одному пересечению. В отличие от этого отношения средних содержаний мышьяка и вольфрама разных разрезов и месторождений весьма сближены по оси абсцисс и благодаря значительному градиенту монотонных изменений позволяют однозначно дифференцировать различные уровни первичных ореолов. Как следует из рис. 10, адекватные сечения ореолов пегматитовых тел как одного, так и другого месторождения характеризуются весьма близкими значениями указанного индикаторного отношения, т. е. в строении ореолов этих элементов выявляется зональность, единая не только качественно, но и количественно. Это означает, что рассматриваемое индикаторное отношение (As/W) может быть использовано в качестве оценки геохимической зональности не только в пределах исследованных пегматитовых полей, но и далеко за их пределами на новых площадях, где «эталонные» месторождения еще не выявлены и геохимически не изучены.

СКАРНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Особенности состава и строения первичных геохимических ореолов скарновых месторождений рассматриваются на примере скарново-полиметаллического и скарново-железородного месторождений.

Месторождение Гарпенберг

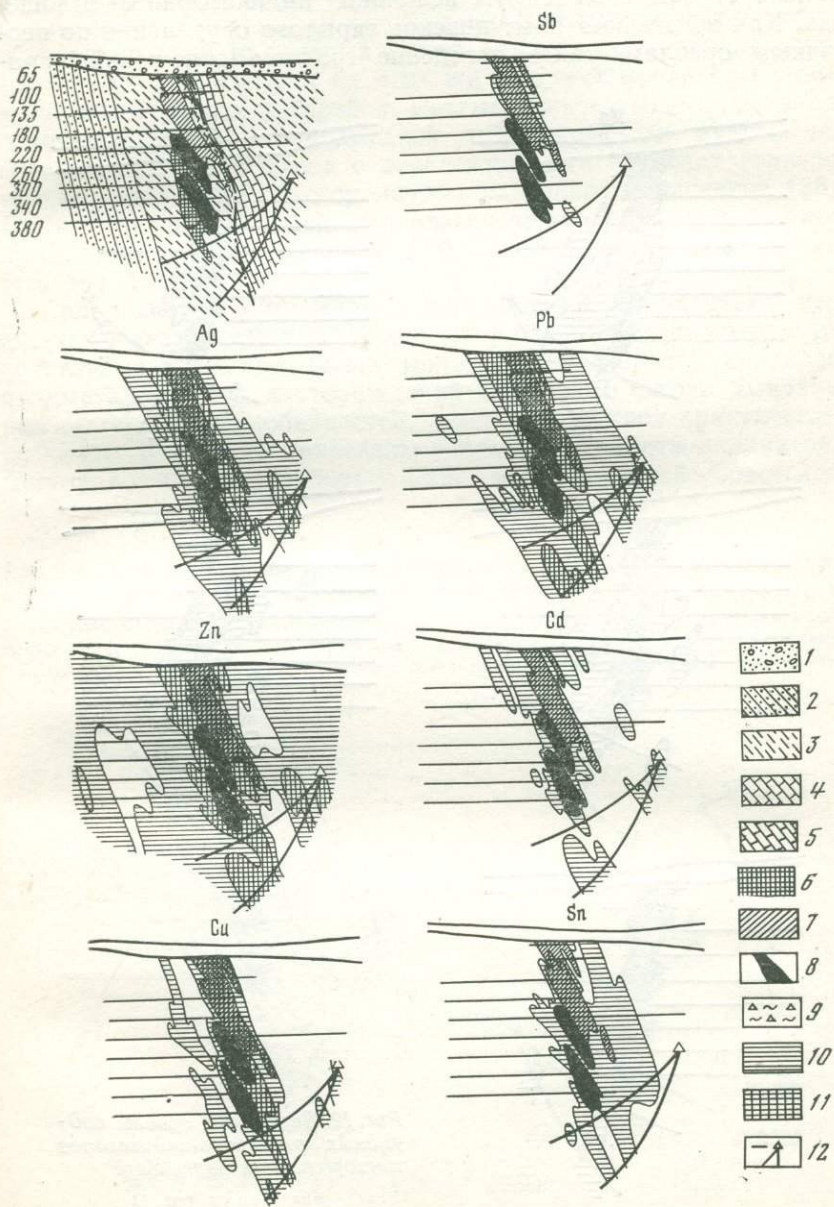
Скарново-полиметаллическое месторождение Гарпенберг расположено в Средней Швеции и локализовано в докембрийских породах. Рудообразующий процесс на этом месторождении связывается со становлением позднепротерозойских гранитных интрузивов, прорывающих дислоцированную толщу лептитов, содержащих слои доломитов [50]. Здесь выделяется три группы минеральных ассоциаций: скарновая, грейзеновая и сульфидная. Рудные тела залегают в скарново-доломитовых или в кварцсерицитовых породах. Они в основном сложены галенитом, сфалеритом, халькопиритом, пиритом, пирротинном, молибденитом, содержат блеклые руды, антимонит, а также сульфоантимониты свинца и самородное серебро. Жильные минералы представлены

кварцем, кальцитом и флюоритом. На верхних горизонтах месторождения руды сильно окислены и нередко образуют скопления в карстовых полостях. Морфология рудных тел сложная. Большой частью они залегают в зонах· послойных, крутопадающих разрывов и образуют серии сближенных линз, склоняющихся в направлении поперечных разрывов. Некоторые из них имеют выходы на современную поверхность, другие относятся к группе скрытых тел, что создает определенные трудности при их поисках. Первичные геохимические ореолы на месторождении изучены путем опробования горных выработок и керн буровых скважин на различных горизонтах. Все отобранные пробы проанализированы методом приближенно-количественного спектрального анализа на широкий круг химических элементов. В результате обработки данных геохимического опробования подземных горных выработок и керн буровых скважин вокруг рудных тел исследованного месторождения выявлены первичные ореолы следующих химических элементов: свинца, цинка, серебра, меди, висмута, олова, кобальта, молибдена, кадмия, сурьмы, вольфрама. Наиболее широки и контрастны ореолы серебра, свинца, цинка меди и кадмия.

На рис. 11, 12 изображены первичные ореолы основных элементов-индикаторов этого месторождения, выявленные по одному из исследованных разрезов, где первичные ореолы по вертикали прослежены более чем на 500 м. В разрезе распределение химических элементов в рудных телах и вмещающих их породах изучено по результатам опробования горных выработок и керн скважин на девяти горизонтах. Сравнительное изучение пространственного положения **ореолов отдельных элементов** выявляет отчетливую вертикальную зональность в строении общего околорудного геохимического ореола. Ореолы таких элементов, как сурьма, а также кадмий, практически развиты только на уровне верхних частей разреза. В противоположность им ореолы вольфрама, кобальта, никеля и молибдена развиваются на уровне выклинивания рудных тел и ниже. Наиболее яркий представитель последней группы элементов — вольфрам, аномальные концентрации которого установлены только в подрудных частях разреза (см. рис. 12).

Рассмотренная выше вертикальная зональность первичных геохимических ореолов может быть выражена следующим рядом элементов-индикаторов: сурьма—кадмий—серебро—свинец—цинк—медь—олово—висмут—(молибден, никель, кобальт)—вольфрам (сверху вниз). Отчетливые сдвиги ореолов никеля, кобальта и молибдена друг относительно друга по вертикали не установлены, поэтому в приведенном ряду эти элементы заключены в скобки. Для количественной характеристики вертикальной зональности первичных ореолов по описываемому разрезу рассчитаны величины отношений линейных продуктивностей частных мультипликативных ореолов для следующих групп элементов-индикаторов: серебро, свинец, цинк (типоморф-

Рис. 11. Первичные ореолы элементов-индикаторов месторождения Гарпенберг
 1 — моренные отложения; 2 — лептиты; 3 — кварциты; 4 — известняки; 5 — доломиты;
 6 — скарны; 7 — окисленные руды; 8 — первичные руды; 9 — зоны дробления пород;
 10, 11 — первичные ореолы (11 — поля повышенных содержаний); 12 — буровые скважины и горные выработки



ный комплекс для верхних сечений ореолов) и медь, висмут, кобальт (индикаторы глубоких срезов ореолов). Как следует из рис. 13, с глубиной происходит резкое убывание величины указанного отношения (более чем в тысячу раз на глубину в 400 м). Однако на глубине уже в подрудной части картина резко меняется и график на уровне самой глубокой скважины фиксирует новый максимум величины индикаторного отношения. Как показывает опыт поисков скрытого оруденения по первичным ореолам, такое поведение графика отношений пара-

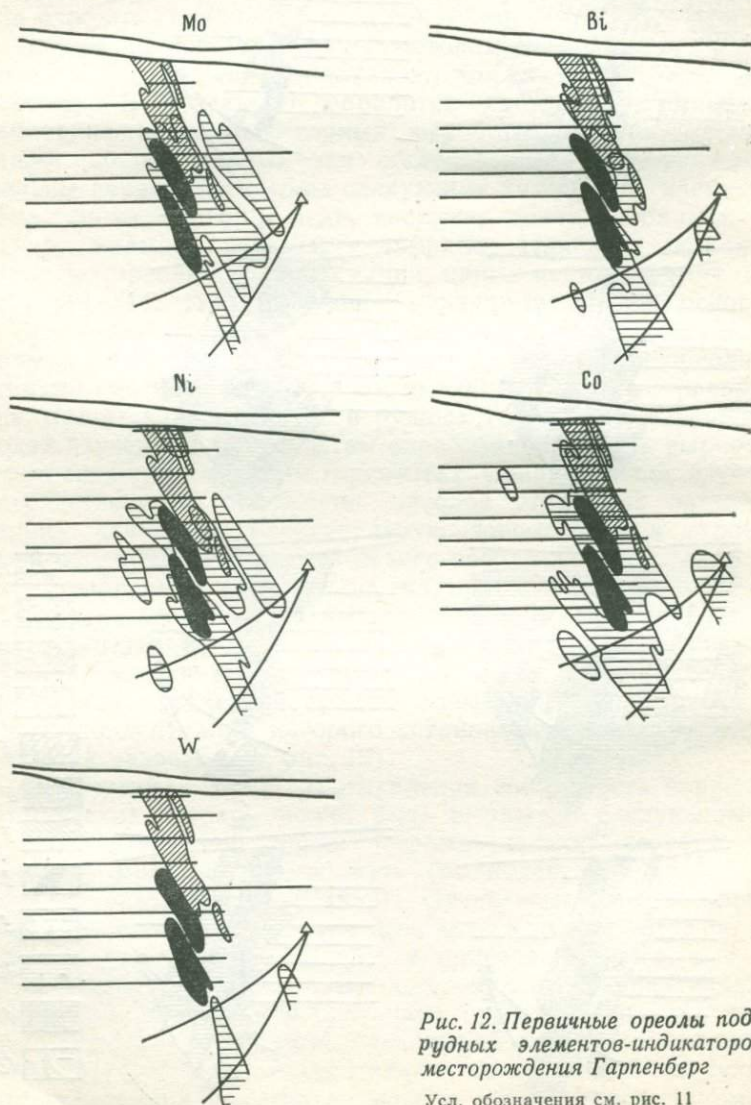


Рис. 12. Первичные ореолы подрудных элементов-индикаторов месторождения Гарпенберг

Усл. обозначения см. рис. 11

метров ореолов могло быть обусловлено наличием на глубине слепого оруденения, надрудные ореолы которого были обнаружены нижними наклонными скважинами. Этот вывод подтверждается особенностями развития ореолов ряда элементов. В частности, как следует из рис. 13, после практически полного выклинивания ореолов кадмия, связанных с известными рудными телами, на уровне самой нижней скважины появляется новая волна аномальных концентраций этого элемента: типичного индикатора надрудных срезов ореолов полиметаллических месторождений. Причем на этих же участках проявлены новые максимумы свинца и серебра. Рассмотренное выше аномальное поведение ореолов в подрудной части известных рудных тел позволило сделать вывод о перспективности глубоких горизонтов исследованного месторождения на слепое оруденение [36]. Данный прогноз подтвержден разведочными работами, вскрывшими примерно на глубине 500 м крупную слепую залежь (см. рис. 13).

Сравнение рассмотренных закономерностей развития первичных геохимических ореолов месторождения Гарпенберг с результатами изучения более молодых по возрасту скарново-полиметаллических месторождений Советского Союза выявляет ряд интересных особенностей, имеющих важное практическое значение. В табл. 3 приведены основные элементы-индикаторы месторождения Гарпенберг и ряда месторождений Советского

Рис. 13. График изменения с глубиной величины мультипликативного коэффициента геохимической зональности первичных ореолов

1 — первичные руды; 2 — окисленные руды; 3, 4 — первичные ореолы (4 — поля максимальных содержаний); 5 — подземные горные выработки; 6 — буровые скважины; 7 — слепые рудные тела, обнаруженные в результате проверки геохимического прогноза

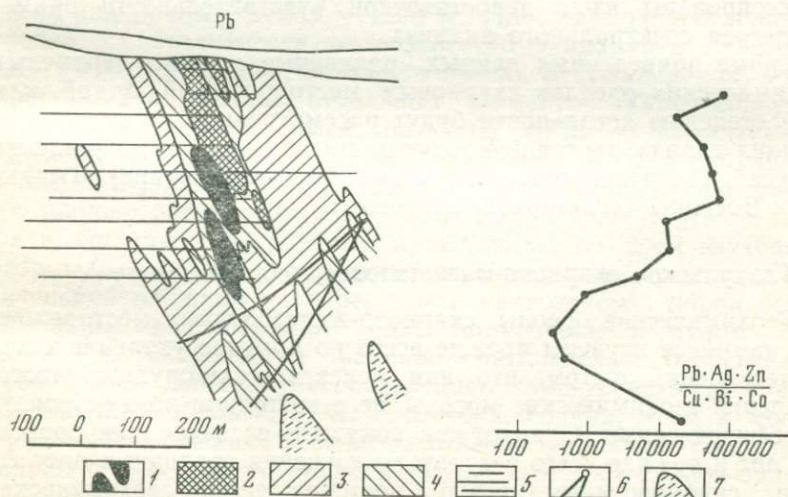


Таблица 3. Элементы-индикаторы скарново-полиметаллического оруденения

Месторождение	Элементы-индикаторы (ряды зональности)
Гарпенберг	Sb, Cd, Ag, Pb, Zn, Cu, Sn, Bi, (Mo, Ni, Co), W
Алтынтопкан	Sb, Cd, (Ag, Pb), (Zn), Cu, Bi, Ni, (Mo, Co, Sn, Be, W)
Новый Камарсай	As, Cd, Ag, Pb, Zn, Cu, Bi*
Курусай	Ba, (As, Sb), Ag, Pb, Zn, Cu, Bi, Co, (Mo, Sn, W)
Тутлы I	Sb, As, Ag, Pb, Zn*
Николаевское	As, Ag, Pb, Zn, Cu, Sn, Ni, Co*
Акташ	(As, Sb), *Ag, Pb, (Zn, Cu), Bi, Co, Sn, Mo

* На месторождениях изучены первичные ореолы ограниченного круга химических элементов.

Союза. Эти элементы расположены в соответствии с зональностью ореолов (ряды зональности). Как следует из табл. 3, все месторождения, несмотря на их резко различные геологические позиции (Гарпенберг позднепротерозойского возраста, остальные — позднепермского-триасового возраста), характеризуются практически единым набором элементов-индикаторов и, что особенно важно, единой геохимической зональностью. Исключение составляет барий, ореолы которого на месторождении Гарпенберг не установлены. Причина здесь, по-видимому, в том, что для бария обычно устанавливается перераспределение [57], которое приводит к выносу этого элемента из околорудного пространства и отложению в надрудных частях ореолов. На месторождении Гарпенберг надрудные ореолы не удалось изучить (оруденение вскрыто эрозией), а ореолы выноса не были зафиксированы из-за недостаточной чувствительности применявшегося спектрального анализа.

Кроме приведенных данных, различные аспекты первичных геохимических ореолов скарновых месторождений с той или иной степенью детальности будут рассмотрены также в последующих главах настоящей работы на примере месторождений Курусай, Николаевское (скарново-полиметаллические), Тырнауз и Восток-2 (скарново-шеелитовые).

Талкульское скарново-магнетитовое месторождение

Геохимические ореолы скарново-железорудных месторождений наименее изучены прежде всего по причине укоренившихся представлений о том, что при поисках железорудных месторождений геохимические методы не в состоянии конкурировать с геофизическими. Однако, как показали исследования последних лет и прежде всего результаты изучения первичных ореолов ряда скарново-магнетитовых месторождений, геохимические

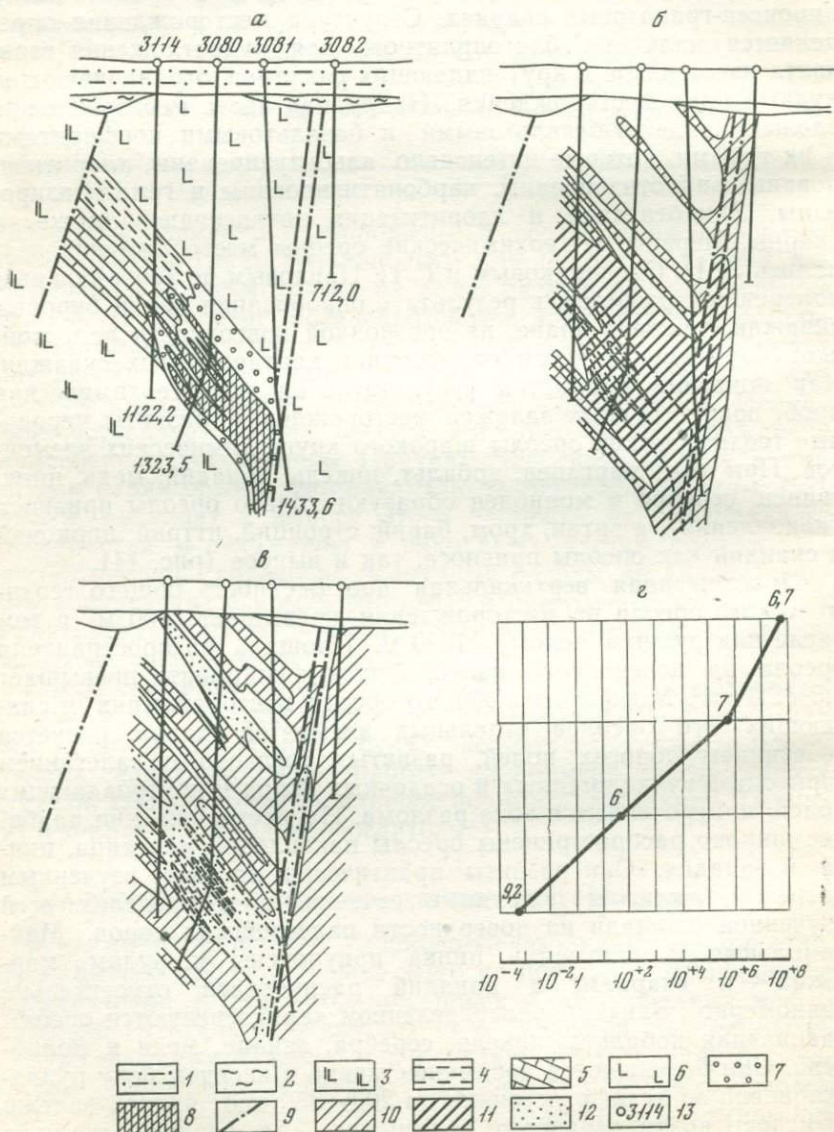
ореолы в определенных условиях с успехом могут быть использованы для поисков глубокозалегающих слепых рудных залежей.

Талкульское месторождение расположено в пределах Соколовско-Сарбайского рудного поля в Тургайском поясе контактово-метасоматических месторождений Урала. Оно относится к скарновому подтипу магнетитовых месторождений и представлено пластовой магнетитовой залежью мощностью до 300 м, залегающей на глубинах 750—1250 м в гранатовых и пироксен-гранатовых скарнах. Структура месторождения определяется наличием благоприятного для рудоотложения горизонта известняков и крутопадающих разломов, ограничивающих рудный блок месторождения. Надрудная часть месторождения сложена андезит-базальтовыми и базальтовыми порфиритами и их туфами, которые интенсивно альбитизированы, хлоритизированы, эпидотизированы, карбонатизированы и гематитизированы. Эпидотизация и хлоритизация затрагивают также и скарны. Первичные геохимические ореолы месторождения изучались Л. Н. Овчинниковым и Г. П. Павловым по вертикальным поперечным разрезам в результате опробования керна буровых скважин, также в плане на эрозионной поверхности палеозойского фундамента путем опробования картировочных скважин. Как показала обработка результатов анализа геохимических проб, вокруг рудных залежей месторождения развиты первичные геохимические ореолы широкого круга химических элементов. При этом марганец, кобальт, никель, ванадий, медь, цинк, свинец, серебро и молибден образуют только ореолы привноса (накопления), а титан, хром, барий, стронций, иттрий, цирконий и скандий как ореолы привноса, так и выноса (рис. 14).

Прослеженная вертикальная протяженность общего геохимического ореола на месторождении превышает 1400 м, в том числе над рудным телом — 1000 м. Площадь распространения ореола на поверхности палеозойского фундамента превышает $4,5 \times 2,3$ км². Морфология общего ореола месторождения и слагающих его ореолов отдельных элементов характеризуется сочетанием пологих полей, развитых согласно с залеганием горизонтов вулканогенных и осадочных пород и крутопадающих полей, приуроченных к зоне разлома. На месторождении наиболее широко распространены ореолы накопления марганца, цинка и ванадия. Они развиты практически по всем изученным разрезам, включая подрудные сечения, и в пределах всей изученной площади на поверхности палеозойских пород. Максимальные концентрации цинка приурочены к рудам, марганца — к скарнам, а ванадий распределен относительно равномерно. Близким распределением характеризуются ореолы накопления кобальта, никеля, серебра, свинца, меди и молибдена. Они развиваются преимущественно висячем боку рудно-скарновой зоны на расстоянии до 200—350 м от рудной залежи и в зоне крутопадающего нарушения — до верхней границы

Рис. 14. Первичные ореолы Талкульского скарново-магнетитового месторождения

a — геологический разрез; *б* — ореолы Mn, Co, Ni, Pb, Zn, Ag, Cu, Mo; *в* — ореолы V, Cr, B, Ba, Sr, Zr, Sc; *г* — график изменения мультипликативного коэффициента зональности (по Г. Н. Павлову); 1 — покровные отложения; 2 — кора выветривания; 3 — андезитовые базальтовые порфириты и их туфы; 7 — скарны; 8 — рудное тело; 9 — разрывные нарушения; 10 — комплексные ореолы в полях совмещения; 11 — ореолов накопления 3—4 элементов, 11 — ореолов накопления 5 элементов и более, 12 — ореолов выноса 3 элементов и более; 13 — геохимически опробованные скважины



коренных пород. Максимальные концентрации почти всех этих элементов устанавливаются в рудах, только медь и молибден концентрируются преимущественно в скарнах.

Для хрома характерны ореолы накопления, широко развитые в висячем и лежащем боках рудной залежи и вдоль зоны разлома. В пределах рудной залежи установлены слабоконтрастные ореолы выноса этого элемента. Цирконий и скандий выносятся из рудной залежи (со стороны лежащего бока) и образуют ореолы накопления преимущественно в надрудной толще пород и в зоне разлома, вдоль которой последние достигают поверхности палеозойских пород. Из рудно-скарновой зоны интенсивно выносятся с образованием ореолов выноса барий, стронций, бор, иттрий и титан. Их концентрации в скарнах и рудах значительно ниже, чем в исходных породах. Барий, стронций, иттрий и титан образуют ореолы выноса также во вмещающих измененных вулканогенных породах. Ореолы накопления этих элементов имеют в основном низкую интенсивность и ограничено распространены на удалении от рудных тел преимущественно в зоне разлома. Исключение из этого составляет бор, ореолы накопления которого развиты в 350—700 м выше рудной залежи во вмещающих порфиритах. Таким образом, по особенностям распределения в вертикальном разрезе в общем ореоле Талкульского месторождения отчетливо выделяются две группы элементов, проявляющих отчетливо выраженный антагонизм: марганец, кобальт, никель, цинк, серебро, свинец, медь и молибден концентрируются в рудах и скарнах, а барий, стронций, бор, иттрий, титан, цирконий, стронций и хром выносятся из руд и скарнов в процессе их формирования. Ванадий в условиях Талкульского месторождения не обнаруживает отчетливой приуроченности к той или иной группе.

Закономерная дифференциация ореолов элементов двух выделенных групп в общем ореоле получает наглядное выражение в распределении полей различной комплексности состава. Если элементы первой группы образуют поля высокой комплексности состава (совмещение ореолов пяти элементов и более) на расстоянии до 250 м над рудной залежью и в зоне рудоконтролирующего разлома, то ореолы накопления элементов второй группы, наоборот, образуют поля комплексного элементного состава (три элемента и более) за пределами рудно-скарновой зоны, на расстоянии до 1000 м над рудной залежью. Все это позволяет выделять в строении общего ореола по меньшей мере две зоны: внутреннюю и внешнюю. Внутренняя зона охватывает окологрудную часть разреза на расстоянии до 250 м над рудной залежью. Для нее характерны ореолы накопления элементов первой группы, а также ванадия и хрома и ореолы выноса элементов второй группы. Внешнюю зону общего ореола на удалении 250—1000 м и более над рудной залежью образуют ореолы накопления элементов второй группы, а также марганец, цинк и ванадий. Для внутренней зоны характерны поля более

высокой комплексности состава (7—8 элементов и более), чем для внешней зоны (3—4, реже 5—6 элементов).

В пределах внутренней и внешней зон общего ореола элементы распределены также зонально: во внутренней зоне наиболее тесно к рудной залежи тяготеют ореолы свинца, меди и серебра, во внешней зоне более верхнее положение занимают ореолы накопления скандия, бора, иттрия и титана. Указанные выше особенности распределения элементов в первичных ореолах Талкульского месторождения получают яркое выражение в закономерностях изменения по вертикали мультипликативных показателей элементов внешней и внутренней зон, а также величин мультипликативного коэффициента зональности, вычисленного как отношение произведений средних концентраций элементов внешней и внутренней зон (см. рис. 14). Наиболее стабильно и контрастно изменяется по вертикали величина мультипликативного коэффициента следующего вида: $Ti \cdot V \cdot Cr \cdot W \cdot Ba \cdot Sc \cdot Sr \cdot Zr/Mn \cdot Co \cdot Ni \cdot Zn \cdot Cu \cdot Pb \cdot Mo \cdot Ag$ — от $9,2 \cdot 10^{-3}$ на уровне рудных тел до $6,7 \cdot 10^7$ в наиболее удаленных надрудных сечениях внешней зоны ореола. Такое возрастание коэффициента зональности по мере удаления от рудных тел обуславливается возрастанием в том же направлении величин мультипликативных показателей элементов внешней и уменьшением мультипликативных показателей элементов внутренней зон в соответствии с указанными выше особенностями распределения элементов в общем ореоле.

АЛЬБИТИТО-ГРЕЙЗЕНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Из месторождений этой группы описываются особенности первичных ореолов комплексного вольфрам-молибден-бериллиевого месторождения грейзеновой формации, описанные в работе «Литохимические методы поисков месторождений вольфрама» [32]. Месторождение связано с массивом редкометалльных апогранитов пермского возраста. Купол апогранитов установлен под толщей верхнесилурийских осадочно-метаморфических пород (песчаники, алевролиты) на пересечении субширотной и субмеридиональной тектонических зон, на поверхности фиксируемых поясами гранитоидных даек. Слепой интрузивный выступ имеет штокообразную форму. Тело гранитов несколько наклонено к западу и по восстанию расчленено на отдельные пластообразные тела (апофизы), секущие песчаники и сланцы. Отдельные апофизы установлены на глубинах 80—100 м от поверхности. В контактовом ореоле интрузии хлоритсодержащие песчаники и сланцы интенсивно биотитизированы, вплоть до образования биотитовых роговиков. Последние вблизи купола апогранитов существенно грейзенизированы. По характеру проявления метасоматических изменений гранитов в пределах массива выделяются три основных разности пород в виде обособленных по вертикали зон. Глубокие горизонты (200—500 м

и более) сложены розовыми порфировидными гранитами мусковит-альбит-кварц-микроклинового состава (зона микроклинизации). Выше, в эндоконтактной части купола, до 200 м от апикального его окончания, расположены альбитизированные окварцованные разности гранитов и развитые по ним кварц-мусковитовые грейзены. Во вмещающих метаморфизованных породах со стороны пологого склона купола апогранитов развита серия крутопадающих рудных кварцевых жил и прожилков, сопровождающихся оторочками грейзенизированных сланцев.

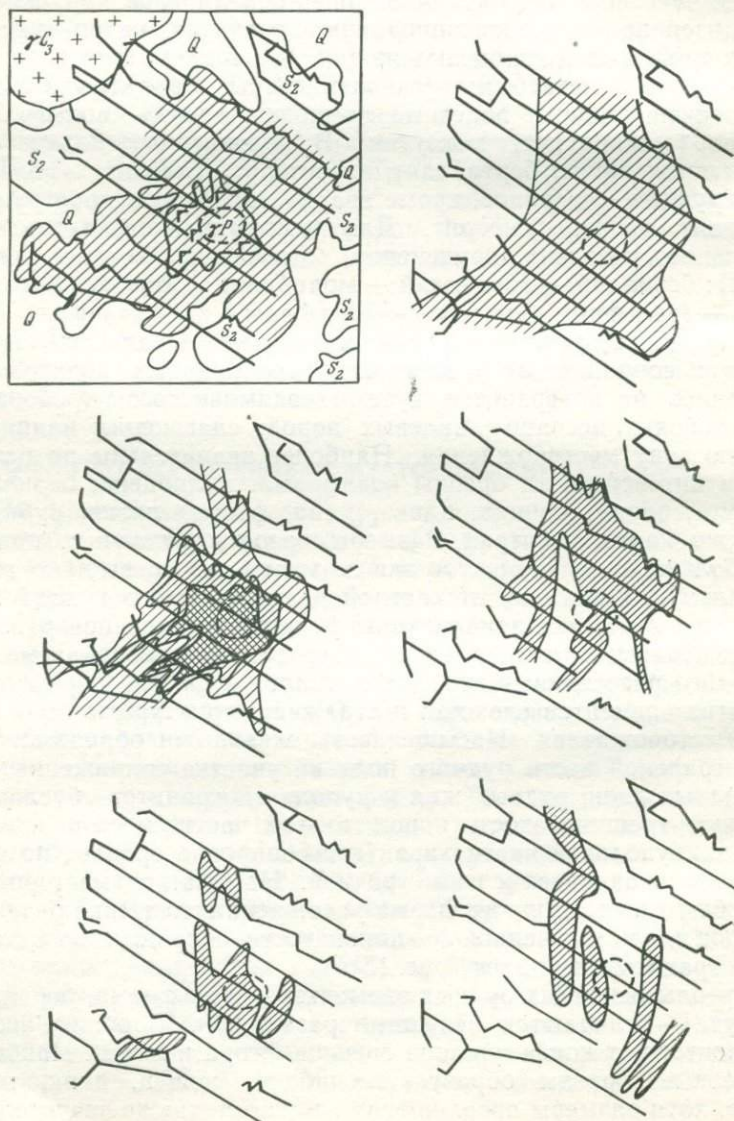
Комплексное вольфрам-молибден-бериллиево оруденение локализовано в грейзенизированных гранитах, кварц-мусковитовых грейзенах и кварцевых жилах. Минеральный состав кварцевых жил и метасоматически измененных гранитов в общем аналогичен. Главные полезные компоненты руд — вольфрамит, берилл, молибденит, висмутин. В подчиненных количествах отмечаются пирит, берtrandит, касситерит, галенит, сфалерит. Из нерудных минералов, кроме кварца, широко распространены мусковит, топаз, флюорит. Для месторождения характерно зональное развитие оруденения, отвечающее схеме (снизу вверх): бериллий — (бериллий + молибден) — (висмут + бериллий) — (вольфрам + висмут) — вольфрам.

Первичные ореолы вокруг массива редкометалльных апогранитов и сопряженных с ними кварцево-жилных образований изучались на поверхности путем геохимического опробования палеозойских песчано-сланцевых пород, слагающих надинтрузивную зону месторождения. Наиболее значительны по размерам и интенсивности ореолы вольфрама, молибдена, бериллия, висмута, олова, свинца, цинка, меди, фтора, лития, рубидия, а также калия и натрия. Размеры ореолов различны, причем для большинства элементов они во много раз превышают горизонтальную проекцию апикальной части скрытого купола апогранитов и участка локализации рудных жил на поверхности. Максимальными размерами характеризуются ореолы элементов широкого рассеяния: щелочных металлов и фтора. Форма ореолов этих элементов сложная и отражает структурные особенности месторождения. Насыщенность жильными образованиями в центральной части рудного поля на участке сопряжения гранитоидных даек, рудных жил и купола апогранитов обусловила высокую трещиноватость пород в этой части месторождения. Для надкупольной части характерны широкие ореолы, по форме приближающиеся к изометричной. На флангах месторождения общая изометричная форма усложнена вследствие развития ореолов вдоль зон мелкой трещиноватости, сопряженных с системами гранитоидных даек (рис. 15).

Ореолы основных рудных элементов — вольфрама, бериллия, висмута — отличаются меньшими размерами. В общих чертах они повторяют конфигурацию ореолов фтора и лития. Наиболее локальные ореолы образует молибден, свинец, цинк, медь, олово, хотя размеры ореолов этих элементов также значительны

Рис. 15. Первичные ореолы элементов на поверхности месторождения

1 — четвертичные отложения; 2 — метаморфизованные песчаники; алевролиты; 3 — хлоритизированные и биотитизированные породы; 4 — грейзенизированные породы; 5 — проекция контура «слепого» купола массива апогранитов; 6 — среднезернистые биотитовые граниты и плагιοграниты; 7 — профили геохимического опробования; 8 — 10 — первичные ореолы (10 — поля максимальных содержаний элементов)



(1—1,5 км²). Внутреннее строение первичных ореолов месторождения сложное. Графики распределения содержаний элементов, построенные по профилям геохимического опробования, осложнены многочисленными пиками и провалами. Общая же закономерность изменения относительных концентраций элементов в ореолах отчетливо выявляется при сопоставлении величин коэффициентов аномальности, вычисленных для различных зон общего ореола (табл. 4). Из приведенных данных следует, что концентрации элементов-индикаторов, за исклю-

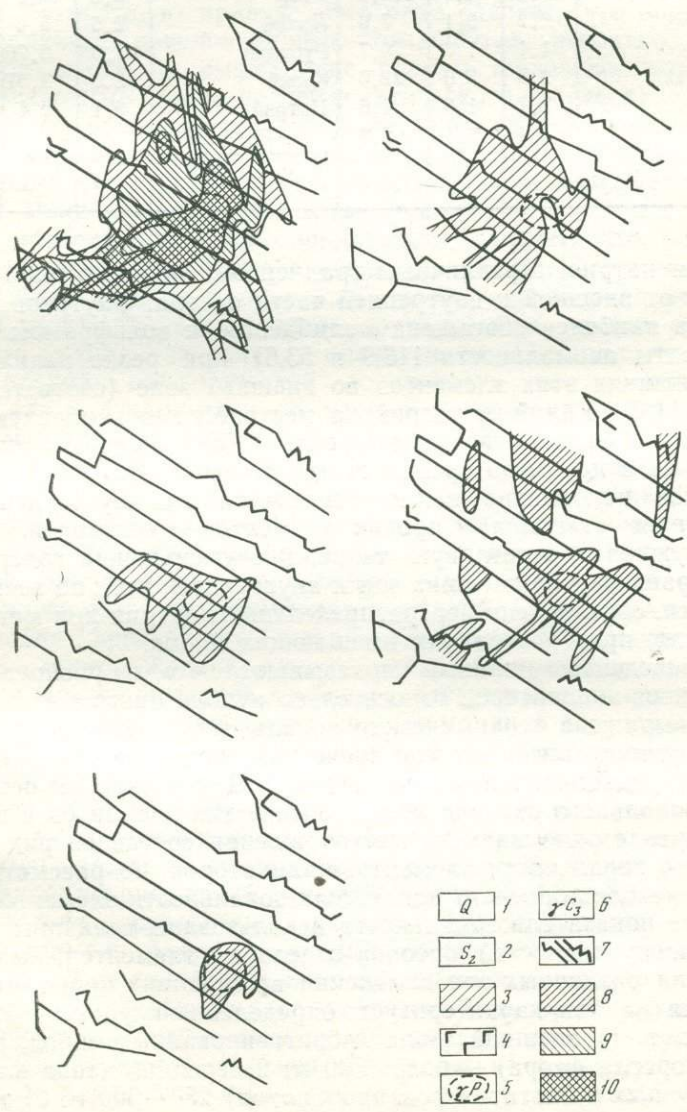


Таблица 4. Величины коэффициентов аномальности элементов-индикаторов

Элементы-индикаторы и коэффициент зональности	Зона ореола			Элементы-индикаторы и коэффициент зональности	Зона ореола		
	внешняя (хлоритовая)	средняя (биотитовая)	внутренняя (грейзеновая)		внешняя (хлоритовая)	средняя (биотитовая)	внутренняя (грейзеновая)
Вольфрам	11,6	30,0	53,5	Медь	4,9	5,2	5,4
Молибден	1,1	4,6	113,9	Фтор	3,8	13,1	22,0
Висмут	2,2	3,1	7,0	Литий	2,6	5,4	22,1
Олово	1,1	1,3	5,7	Рубидий	3,03	5,76	24,8
Бериллий	2,5	5,0	22,0	Калий	2,0	2,37	5,45
Свинец	2,7	1,6	2,6	Натрий	6,1	6,4	3,5
Цинк	1,4	2,1	8,8	Cu·Pb·Zn·Bi	11,5	—	0,0005
				Sn·Be·Mo ²			

чением натрия, с различным градиентом, но монотонно возрастают от внешней к внутренней части ореола. Внутренняя зона ореола наиболее обогащена молибденом и вольфрамом (коэффициенты аномальности 113,9 и 53,5) при резко пониженных содержаниях этих элементов во внешней зоне (соответственно 1,1 и 11,6). Калий и натрий на месторождении образуют широкие, но мало контрастные ореолы. Коэффициенты аномальности их в целом по ореолу соответственно 3,83 и 5,1. Максимальное накопление калия отмечается во внутренней зоне. В отличие от калия и прочих элементов-индикаторов, натрий обнаруживает отчетливую тенденцию уменьшения содержания в направлении от внешних зон к внутренним, что, по всей вероятности, обусловлено перераспределением натрия при метасоматических преобразованиях вмещающих пород.

Приведенные данные показывают, что в распределении элементов-индикаторов относительно купола апогранитов отчетливо выражена геохимическая зональность, которая в общем виде согласуется с метасоматической, проявленной в породах кровли редкометалльных апогранитов. Для уточнения особенностей зонального распределения химических элементов в первичном ореоле описываемого месторождения составлен ряд вертикальной зональности элементов-индикаторов по рассмотренной выше методике расчета показателя зональности элементов. При расчете показателя зональности использованы величины линейных продуктивностей ореолов отдельных элементов, вычисленные для различных зон изменения вмещающих пород, так как каждая из зон характеризует определенный уровень ореола, а именно: 1) внешний (зона хлоритизированных пород, до границы ореола фтора) — более 500 м; 2) средний (зона хлоритизированных и биотитизированных пород) 250—500 м; 3) нижний

(зоны хлоритизированных, биотитизированных и грейзенизированных пород) 0—250 м.

Ряд зональности элементов-индикаторов в ореоле имеет вид: натрий — калий — рубидий — медь — свинец — цинк — литий — фтор — вольфрам — висмут — олово — бериллий — молибден (от внешней зоны к внутренней). Положение каждого элемента в ряду зональности определяет уровень его максимального накопления относительно прочих компонентов и отражает общую тенденцию изменения параметров ореолов по вертикали в соответствии с последовательностью рудоотложения. В частности, из приведенного ряда следует, что образованию первичных ореолов рудных компонентов, вероятно, предшествует вынос во вмещающие породы щелочных металлов (раннещелочные стадии послемагматического процесса), обусловивший образование зон относительного накопления калия, натрия и рубидия в верхних частях зональной колонны. Далее происходит формирование первичных ореолов вольфрама, бериллия, молибдена и других элементов.

Из приведенного ряда зональности следует, что область максимального накопления вольфрама, молибдена, олова, висмута и бериллия, во фронтальной части которой расположены фтор и литий, проявлена гипсометрически ниже уровня относительного накопления свинца, цинка, меди. Отметим, что ряд вертикальной геохимической зональности не противоречит общей схеме зональности отложения, установленной на редкометальных грейзеновых месторождениях. Последняя, по данным Г. Н. Щербы [92] имеет вид (сверху вниз): медь, цинк, свинец, вольфрам, висмут, бериллий, молибден, олово. Исходя из приведенного выше, можно предположить ряд индикаторных отношений, которые, являясь оценками геохимической зональности ореолов, могут быть использованы для определения уровня эрозионного среза геохимических аномалий. Отметим, что оценка уровня эрозионного среза геохимических аномалий при поисках месторождений данного типа в принципе сводится к определению примерной глубины залегания кровли гранитного массива, поскольку геохимические аномалии в надинтрузивной зоне не вскрытых эрозией гранитных массивов одновременно являются надрудными.

Очевидно, что в практическом отношении удобнее пользоваться таким коэффициентом зональности, который включает элементы, анализ на которые экономически наиболее выгоден. Так, калий, натрий, литий, рубидий и фтор требуют привлечения относительно дорогостоящих методов анализа (щелочи — фотометрия пламени, фтор — трудоемкий количественный спектральный анализ). В отличие от этого для рудных элементов удовлетворительные результаты дает экспрессный спектральный анализ, обеспечивающий одновременное определение с достаточной для целей геохимических поисков точностью и чувствительностью содержаний перечисленных в ряду зональности рудных элемен-

тов-индикаторов описываемого типа оруденения, за исключением вольфрама, чувствительность рядового спектрального анализа на который недостаточна. Эти элементы: медь, свинец, цинк, вольфрам, висмут, олово, бериллий, молибден. Помня, что наиболее контрастная зональность выявляется с помощью мультипликативного геохимического коэффициента, можно предложить следующий вариант коэффициента зональности: $Cu \cdot Pb \cdot Zn \cdot Bi/Sn \cdot W \cdot Mo^2$ (молибден возведен в квадрат для обеспечения безразмерности коэффициента, так как в знаменателе число элементов меньше). По величине этого коэффициента фиксируется контрастная зональность, которая геохимически отчетливо дифференцирует различные зоны ореолов: по мере приближения к рудоносному массиву величина этого коэффициента закономерно уменьшается более чем на четыре порядка (см. табл. 4).

ПЛУТОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Некоторые особенности первичных ореолов гидротермальных месторождений описываются на примере месторождений Кафан, Каратаг IV и Бом-Горхон. При выборе этих месторождений прежде всего учитывались морфологические особенности рудных тел: последние на этих месторождениях представлены жилами и штокверками, т. е. наиболее характерными для гидротермальных месторождений морфологическими типами оруденения. Геохимические особенности других представителей обширнейшей группы гидротермальных месторождений рассматриваются в последующих главах при обсуждении различных аспектов методики литохимических поисков гидротермальных месторождений.

Месторождение Кафан

Кафанское медное месторождение расположено в юго-восточной части Армянской ССР, в междуречье нижних течений рек Вохчи и Халадж. Рудное поле месторождения сложено туфогенно-осадочными породами юрского возраста. Оруденение на месторождении приурочено исключительно к толще среднеюрских (байос) вулканогенно-осадочных пород, представленных кварцевыми, кварцево-плагноклазовыми и плагноклазовыми порфиритами, их туфами и туфобрекчиями. В туфогенно-осадочной толще верхней юры (оксфорд-кимеридж) оруденения не встречено. Минеральный состав руд месторождения сравнительно прост: это в основном халькопирит и пирит с незначительной примесью других менее распространенных сульфидов, таких как борнит, теннантит, сфалерит, марказит. Из нерудных минералов в рудных телах встречаются кварц и в ничтожных количествах кальцит и диккит. На месторождении оруденение морфологически представлено рудными телами двух типов, жилами

и штокверком. Жилы представлены плитообразными телами с четкими контактами. Для иллюстрации особенностей первичных ореолов рудных жил на рис. 16 и 17 в вертикальном поперечном разрезе изображены первичные ореолы основных элементов-индикаторов медного оруденения вокруг рудной жилы крутого падения. Несмотря на небольшую мощность рудной жилы (не более нескольких десятков см), первичные ореолы имеют значительную ширину (десятки метров) и, развиваясь согласно с рудной жилой, резко вытянуты по вертикали. В строении первичных ореолов отчетливо проявлена вертикальная зональность: ореолы бария и мышьяка обладают максимальной интенсивностью и шириной в надрудной части разреза. С глубиной, наряду с постепенным выклиниванием ореолов этих элементов, происходит отчетливое усиление ореолов меди, кобальта, висмута (см. рис. 17). На месторождении помимо жил известны также штокверки с прожилково-вкрапленным оруденением. Ореолы вокруг штокверковых тел более изометричны и, как следует из рис. 18, также характеризуются отчетливой вертикальной зональностью: частные мультипликативные ореолы надрудных (барий, мышьяк, свинец) и подрудных (висмут, кобальт, никель) элементов представляют как бы зеркальное отражение друг друга.

Месторождение Каратас IV

Медно-молибденовое месторождение Каратас IV расположено в Северном Прибалхашье в зоне Каратасского рудного узла. Участок месторождения сложен в южной части гранодиоритами и гранитами, в центральной и северной — биотитовыми гранитами и гранит-порфирами. В районе месторождения развиты дайки диабазовых и диоритовых порфиритов, а также пегматит-аплиты. Для месторождения весьма характерны разрывные нарушения, преимущественно северо-восточного и северо-западного направлений. Рудная минерализация приурочена к густой сети трещин, развитых в рудовмещающих породах. На месторождении в пределах минерализованной площади выделяются четыре рудных тела с промышленной концентрацией молибдена. Простираение рудных тел северо-восточное, падение 70° на северо-запад. Главные рудные минералы на месторождении — молибденит, в меньших количествах встречается халькопирит. Отмечаются также магнетит, гематит, галенит и сфалерит.

Первичные ореолы описываемого месторождения изучены С. В. Григоряном и Г. Э. Федотовой по результатам опробования керна буровых скважин по ряду разрезов. Как следует из рис. 19 и 20, по разрезу наиболее широкие и интенсивные ореолы образуют молибден и медь. Менее контрастны и широки ореолы других элементов. В строении ореолов выявлена отчетливая геохимическая зональность: свинец, серебро, барий и цинк образуют широкие и достаточно контрастные ореолы в верхних

Рис. 16. Первичные ореолы вокруг рудных жил в разрезе

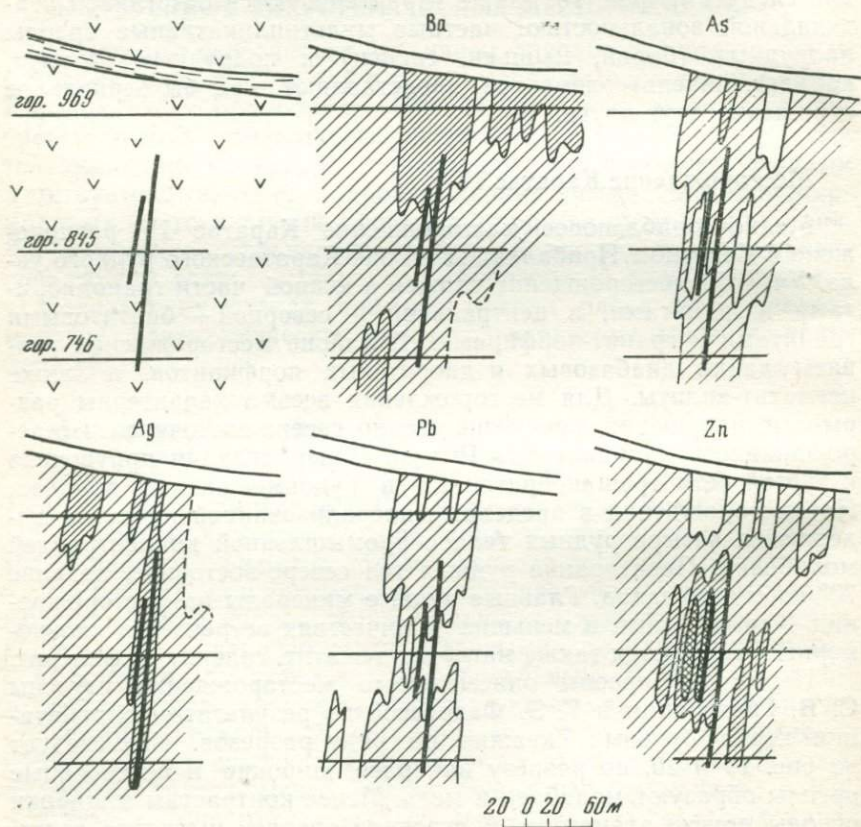
1 — кварцевые порфириты; 2 — зоны разлома; 3 — рудные жилы; 4 — 5 — первичные ореолы (5, 6 — поля повышенных содержаний элементов); 7 — интервалы опробования

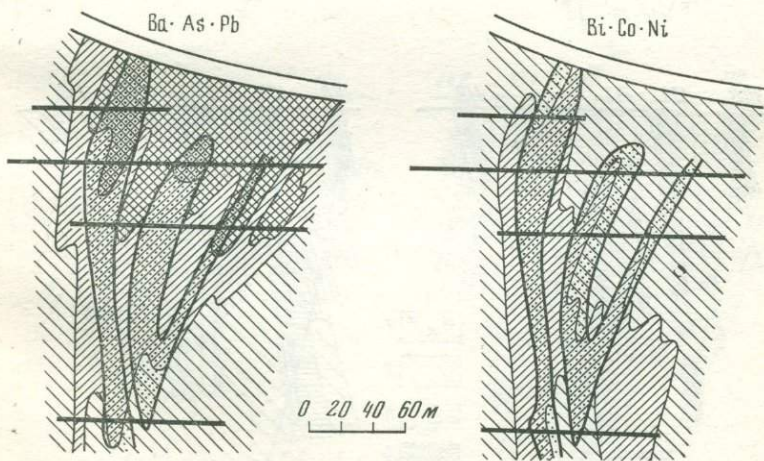
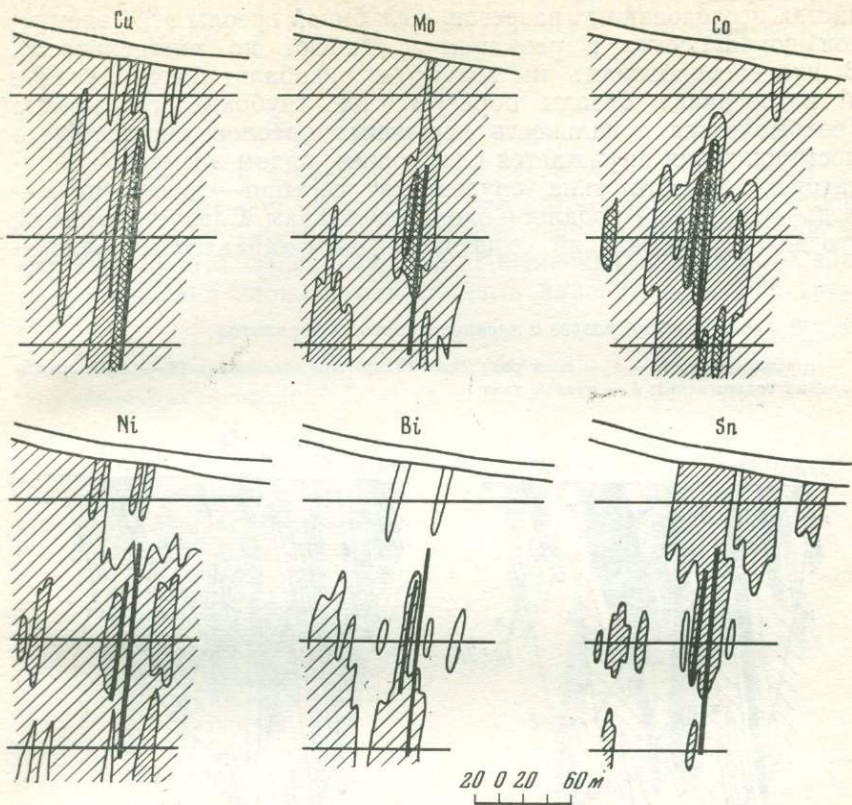
Рис. 17. Первичные ореолы подрудных элементов вокруг рудных жил в разрезе

Усл. обозначения см. рис. 16

Рис. 18. Частные мультипликативные ореолы вокруг штокверка рудника 7—10 Кафанского месторождения

1 — зоны штокверка; 2 — 4 — первичные ореолы (4 — поля максимальных значений произведения содержаний элементов-индикаторов); 5 — подземные горные выработки

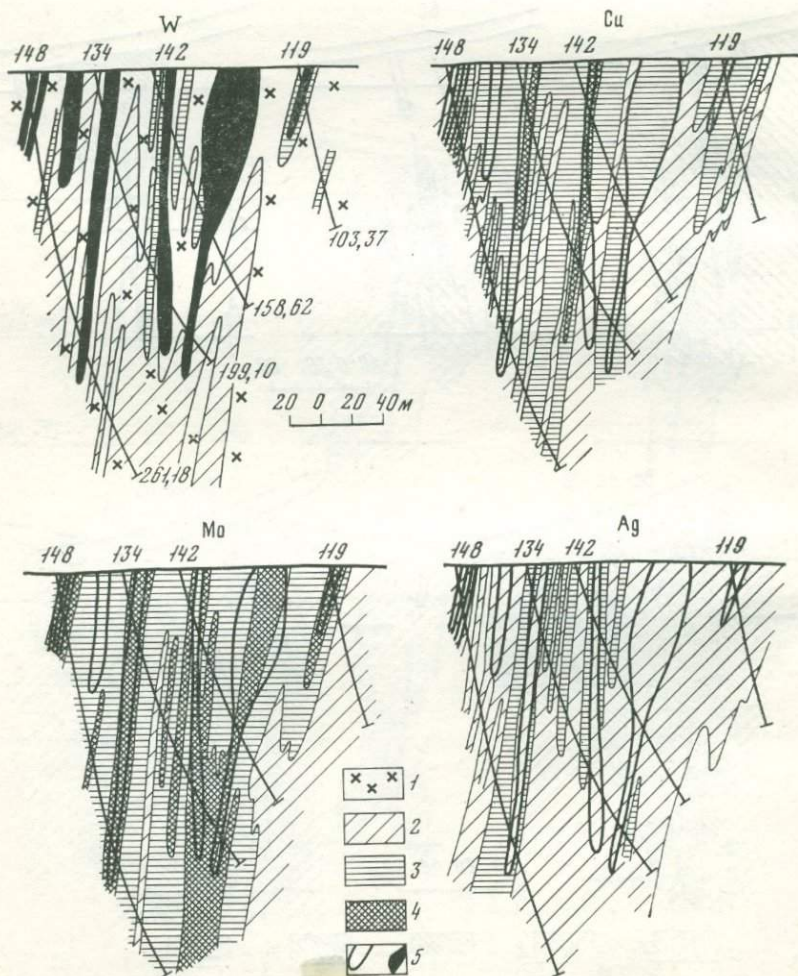




частях исследованных разрезов, с глубиной ореолы этих элементов сокращаются в размерах и слабеют по интенсивности. В противоположность им вольфрам и кобальт более широкие и интенсивные ореолы образуют на глубоких горизонтах. Геохимическая зональность первичных ореолов описываемого месторождения выражается следующим рядом элементов-индикаторов данного типа оруденения: серебро—свинец—цинк—медь—молибден—кобальт—олово—вольфрам. Следует отметить, что для месторождений со штокверковым характером орудене-

Рис. 19. Геологический разрез и первичные ореолы элементов

1 — гранодиориты; 2 — 4 — поля различных содержаний элементов (4 — поля максимальных содержаний); 5 — рудные тела



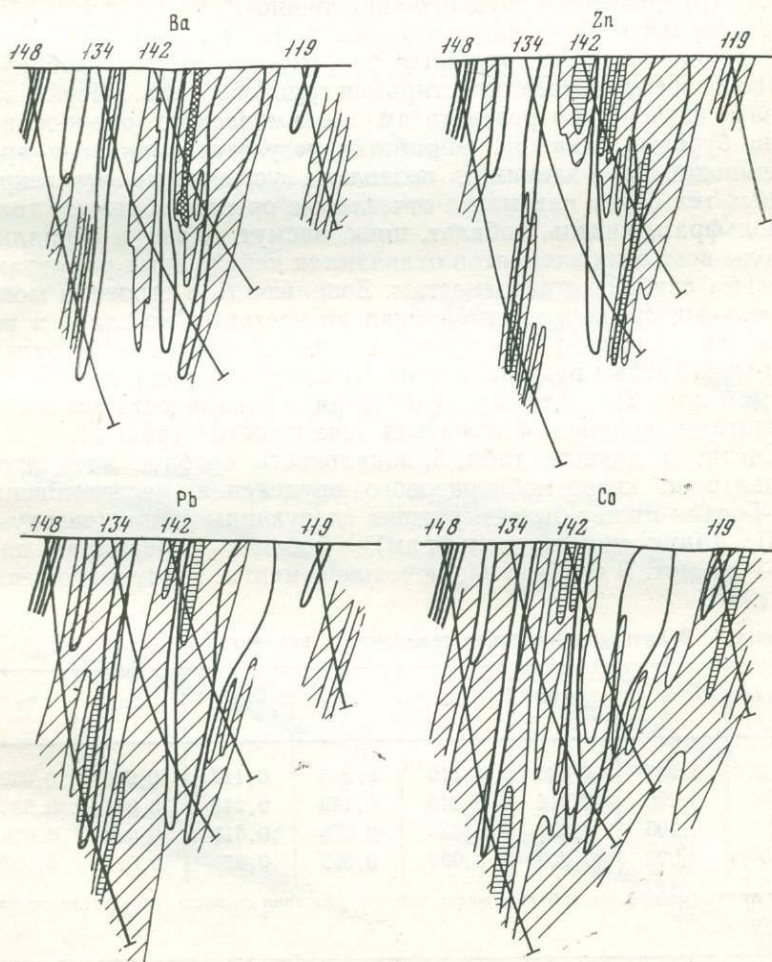
ния первичный ореол в значительной своей части представлен рудными телами, в отличие от жильных тел, где рудные жилы занимают ничтожную часть первичного ореола.

Месторождение Бом-Горхон

Особенности развития первичных ореолов вокруг рудных тел кварц-гюбнеритовой формации рассматриваются на примере месторождения Бом-Горхон, расположенного на юго-западных отрогах хребта Цаган-Хуртгей (Читинская область). Район месторождения сложен гранитоидами нижнего палеозоя, среди

Рис. 20. Первичные ореолы элементов в разрезе

Усл. обозначения см. рис. 19



которых отмечаются разрозненные ксенолиты кристаллических сланцев малханского комплекса. Месторождение приурочено к юго-западному эндоконтакту Бом-Горхонского гранитного массива и представлено многочисленными жилами кварц-гюбнеритового состава. Промышленное оруденение представлено жилами, которые прослеживаются на поверхности непрерывно на значительном протяжении и распространяются на глубину от 150 м до 1 км и более. Простираение жил северо-восточное, падение на юго-восток под углами 18—35°. Месторождение относится к кварцевому типу кварц-гюбнеритовой формации. Морфология жил сложная, с частыми раздувами и пережимами. Около жил слабо развиты грейзены кварц-слюдистого состава. Основным промышленно-ценным минералом руд является гюбнерит. В незначительных количествах присутствуют сфалерит, касситерит, козалит. Распределение минералов в жильной массе неравномерное, гнездово-вкрапленное.

Особенности первичных ореолов рудных тел описываемого месторождения иллюстрируются рис. 21, где ореолы изображены по разрезу вкрест простираения рудного тела. Первичные ореолы изучены по результатам геохимического опробования керна буровых скважин. Обработка результатов анализа проб на широкий круг элементов позволила установить, что вокруг рудных тел более или менее отчетливые ореолы образуют только вольфрам, никель, кобальт, цинк, висмут, олово и бериллий. Ореолы всех этих элементов отличаются небольшими размерами и весьма слабой интенсивностью. Зональность в строении моноэлементных ореолов также проявлена чрезвычайно слабо и выражается в расширении ореолов цинка, никеля и кобальта к верхним частям разреза, а ореолов олова и бериллия — к нижним (см. рис. 21). Для определения ряда зональности элементов рассчитаны величины показателя зональности (табл. 5).

Согласно данным табл. 5, зональность ореолов элементов-индикаторов кварц-гюбнеритового оруденения месторождения Бом-Горхон может быть выражена следующим рядом (сверху — вниз): (цинк, никель, вольфрам) — кобальт — (бериллий, олово) — висмут. В скобках заключены элементы, взаимоотношения

Таблица 5. Величины показателя зональности элементов

Сечение	W	Ni	Co	Zn	Bi	Sn	Be
I	0,330*	0,040	0,110	0,295	0,127	0,008	0,002
II	0,290	0,016	0,210	0,149	0,248	0,041	0,008
III	0,106	0,007	0,023	0,078	0,510	0,220	0,026
IV	0,022	0,0003	0,009	0,009	0,850	0,013	0,002

* Полу жирным шрифтом набраны максимальные значения величин показателя зональности.

между которыми точно не установлены, поскольку максимальные значения показателя зональности этих элементов установлены на одних и тех же горизонтах. Уточнение взаимоотношений этих элементов по величинам градиентов по рассмотренной выше методике не производилось, ибо при выборе мультипликативных геохимических коэффициентов надобности в таких уточнениях, как правило, не бывает: обычно вся группа оказывается целиком в числителе или знаменателе. Частные мультипликативные ореолы, построенные для групп верхнерудных (цинк, никель, вольфрам) и нижнерудных элементов (бериллий, олово, висмут), отличаются от моноэлементных ореолов более значительными размерами и высокой контрастностью (рис. 22) и, естественно, являются более надежными в практическом отношении. Другой важнейшей особенностью частных мультипликативных ореолов является контрастная зональность в направлении восстания рудного тела, которая может быть использована для оценки уровня эрозионного среза рудных тел и сопровождающих их первичных ореолов. Зональность в строении

Рис. 21. Первичные ореолы элементов в разрезе

1 — биотитовые граниты; 2 — гранодиориты; 3 — рудное тело; 4 — разрывное нарушение; 5 — первичный ореол; 6 — буровые скважины

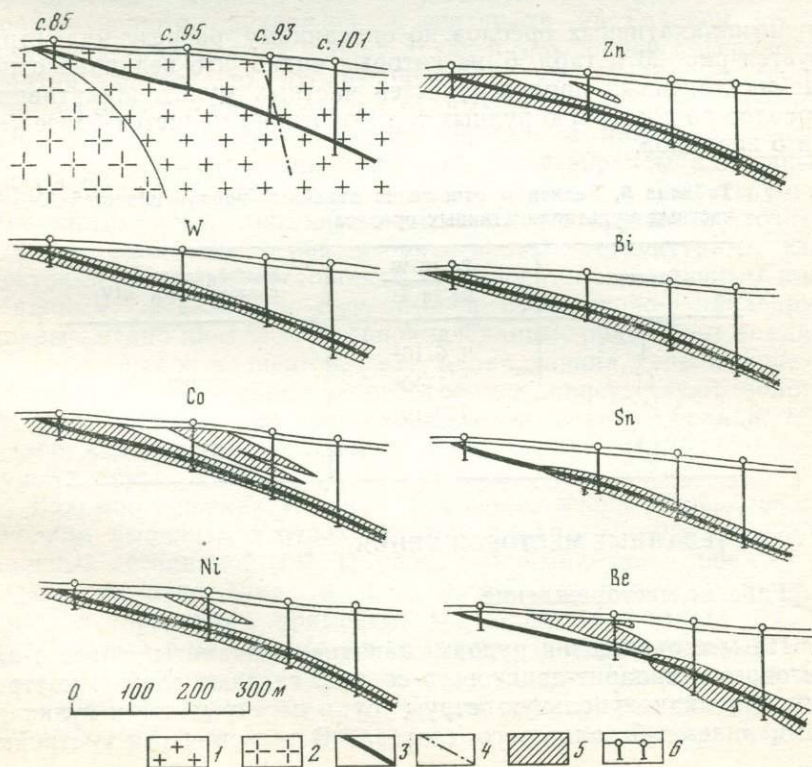
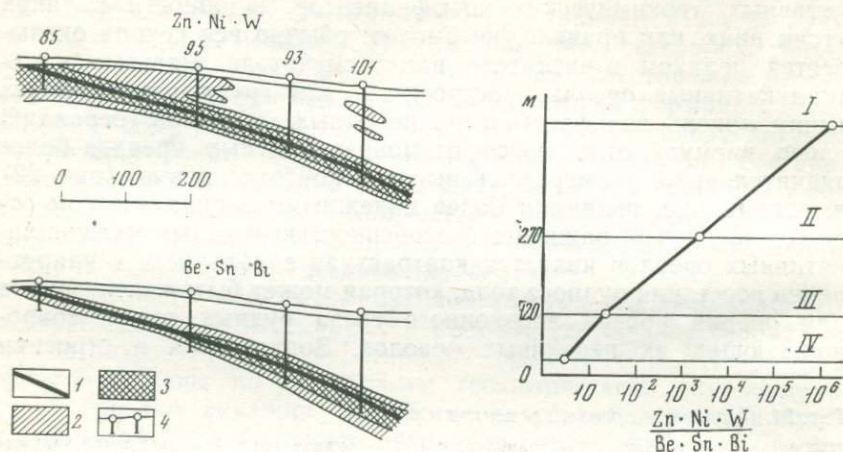


Рис. 22. Частные мультипликативные ореолы

1 — рудное тело; 2, 3 — первичные ореолы (3 — поля максимальных значений); 4 — буровые скважины

Рис. 23. Графики изменения в разрезе величины мультипликативного коэффициента геохимической зональности



мультипликативных ореолов по описанному разрезу иллюстрируется рис. 23 и табл. 6, из которых видно, что величина отношения линейных продуктивностей частных мультипликативных ореолов по восстанию рудных тел монотонно меняется более чем на 5 порядков.

Таблица 6. Величины отношения линейных продуктивностей частных мультипликативных ореолов

Сечение	$\frac{Zn \cdot Ni \cdot W}{Be \cdot Sn \cdot Bi}$	Коэффициент контрастности I/IV
I	$1,6 \cdot 10^6$	533000
II	$2,1 \cdot 10^3$	
III	$1,9 \cdot 10$	
IV	3,2	

КОЛЧЕДАННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Гайское месторождение

На месторождении рудовмещающие вулканы андезит-дацитового и липарит-дацитового состава слагают сложно построенную вулканокупольную структуру и перекрываются вулканами андезит-базальтового состава. В осевой части постройки

на расстоянии 5,5 км при ширине 0,5—0,6 км прослеживается субвертикальная многожерловая зона, насыщенная разновозрастными жерловыми, экструзивными, субвулканическими телами и дайками андезито-дацито-липаритового состава, а также субвулканическими телами и дайками базальтоидов. В пределах этой зоны и находятся все колчеданные залежи месторождения. Боковыми ограничениями зоны являются Западный и Восточный ограничивающие разломы, представляющие собой фрагмент Гайской зоны разломов. В осевой части зоны прослеживается Центральный разлом. Важную роль в строении рудовмещающей зоны играют диагональные нарушения, расчленяющие ее по простиранию на Северный, Промежуточный и Южные блоки, которые в свою очередь делятся на более мелкие поперечные блоки.

В пределах месторождения выделяются четыре рудные залежи, состоящие обычно из нескольких рудных тел, сложенных сплошными и прожилково-вкрапленными рудами. Наиболее крупные Третья и Пятая залежи. Колчеданные залежи в пределах рудовмещающей многожерловой зоны распределены неравномерно. Они приурочиваются к участкам чередования жерловых тел кластических вулканитов с жерловыми телами монолитных вулканитов, с субвулканическими телами и дайками. Для локализации рудных тел благоприятно наличие экранирующих низкопроницаемых вулканитов. Диапазон развития промышленного оруденения по вертикали на Гайском месторождении уникален: от уровня древней эрозионной поверхности (Пятая залежь) до глубины более 1,5 км (Северный фланг Третьей залежи). Морфология рудных тел, залегающих в верхней части многожерловой зоны, штоко- и линзообразная и характеризуется сочетанием пологих (под экраном надрудных пород) и крутых элементов; тела, залегающие в более глубоких частях зоны, линзообразные и имеют крутые восточные падения, согласные с общей ориентировкой структурных элементов зоны. Руды месторождения относятся к типичным колчеданным; выделяются сплошные и прожилково-вкрапленные медные, медно-цинковые и серноколчеданные руды. Помимо главных полезных компонентов, меди, цинка, свинца, серы и железа, в рудах в повышенных концентрациях присутствуют золото, серебро, мышьяк, кобальт, барий, теллур, галлий, германий, кадмий, таллий, висмут, индий, никель, молибден, олово, сурьма, ртуть.

Взаимоотношения главных рудообразующих минералов позволили выделить в рудах несколько парагенетических минеральных ассоциаций [14]: 1) реликтовых минералов, образовавшихся до отложения главной массы сульфидов; 2) ранние рудные: пиритовая с примесями халькопирита и золота и халькопиритовая с примесями блеклых руд; 3) перекристаллизованного крупнозернистого пирита и халькопирита; 4) поздние рудные: сфалеритовая с пиритом, халькопиритом и блеклыми рудами и пирит-борнитовая; 5) завершающие кварц-карбонатно-барито-

вые с клейфаном, поздними генерациями пирита, халькопирита и блеклых руд.

Вулканогенные породы, слагающие Гайскую постройку, претерпели региональный метаморфизм и окolorудные гидротермально-метасоматические изменения. Региональные метаморфические преобразования пород, представленные пренит- и пумпеллитсодержащими ассоциациями и ассоциацией фации зеленых сланцев, имеют широкое площадное развитие. На них накладываются гидротермально-метасоматические изменения, которые охватывают практически нацело рудовмещающую многожерловую зону и затрагивают вмещающие ее породы. В строении ореола измененных пород выявлена следующая направленная зональность (от центральных, тыловых зон к внешним, фронтальным): вторичные кварциты, кварц-серицитовые и серицит-кварцевые породы и сланцы, хлорит-серицит-кварцевые и хлоритовые породы и сланцы, альбитизированные и эпидотизированные породы, гематитизированные породы и карбонатизированные породы.

Детальная разведанность месторождения глубокими скважинами и горными выработками, сделала Гайское месторождение исключительно благоприятным объектом для объемного изучения первичных геохимических ореолов.

Наиболее отчетливыми являются ореолы меди, цинка, свинца, бария, серебра, мышьяка, кобальта и молибдена. Помимо указанных выше элементов, первичные ореолы на месторождении образуют и некоторые элементы-примеси рудовмещающих пород: ванадий, марганец, хром, титан, скандий, а также ртуть и йод. Морфология и размеры первичных ореолов, как и самого месторождения, определяются формой и размерами палеовулкана. Протяженность ореола в плане 5,5—6 км при ширине 1,5—2,5 км, а вертикальная протяженность, как показывает его реконструкция, превышает 2,5 км (рис. 24, 25). Максимальная прослеженная протяженность ореолов над рудными телами по восстанию рудовмещающих структур достигает 1 км (северный фланг месторождения). Наиболее значительны по размерам ореолы меди и цинка, в контуры которых вписываются ореолы всех других элементов-индикаторов. В пределах общего комплексного ореола месторождения ореолы различных элементов пространственно совмещаются в разнообразных сочетаниях, образуя поля различных ассоциаций элементов.

Морфология и строение первичных ореолов на месторождении определяется неоднородным блоковым строением рудовмещающей многожерловой зоны и рудоконтролирующей ролью меридиональных и диагональных нарушений (рис. 26). В поперечных сечениях рудной зоны различные структурно-морфологические экраны и пологие послойные нарушения, сопрягающиеся с главными рудоконтролирующими разломами, значительно усложняют морфологию и строение первичных геохимических ореолов и обуславливают комбинированный структурно-

Рис. 24. Первичные ореолы меди; разрез 105 месторождения Гай
(по В. М. Рыфгину)

1 — 6 — первичные ореолы (5, 6 — поля максимальных содержаний меди); 7 — буровые скважины; 8 — рудные тела

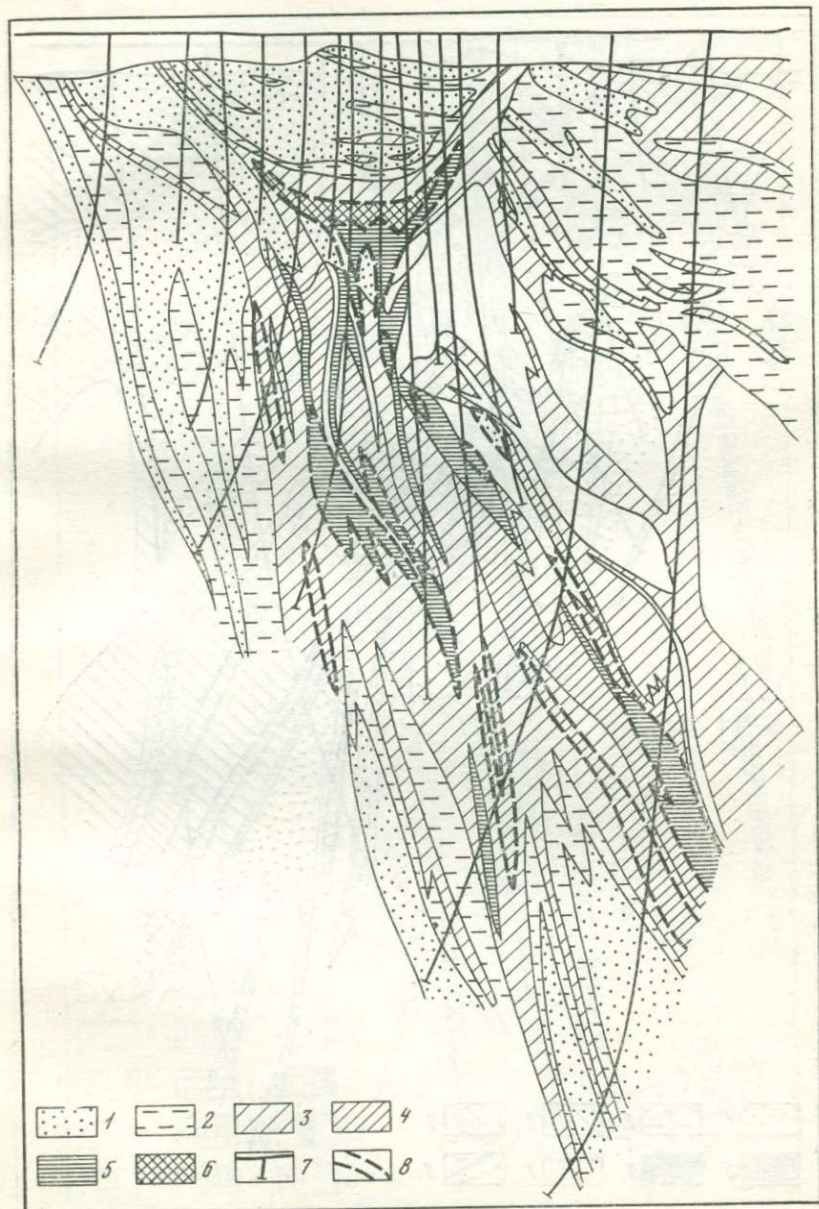


Рис. 25. Первичные ореолы цинка, разрез 105 месторождения Гай
(по В. М. Рыфину)

Усл. обозначения см. рис. 24

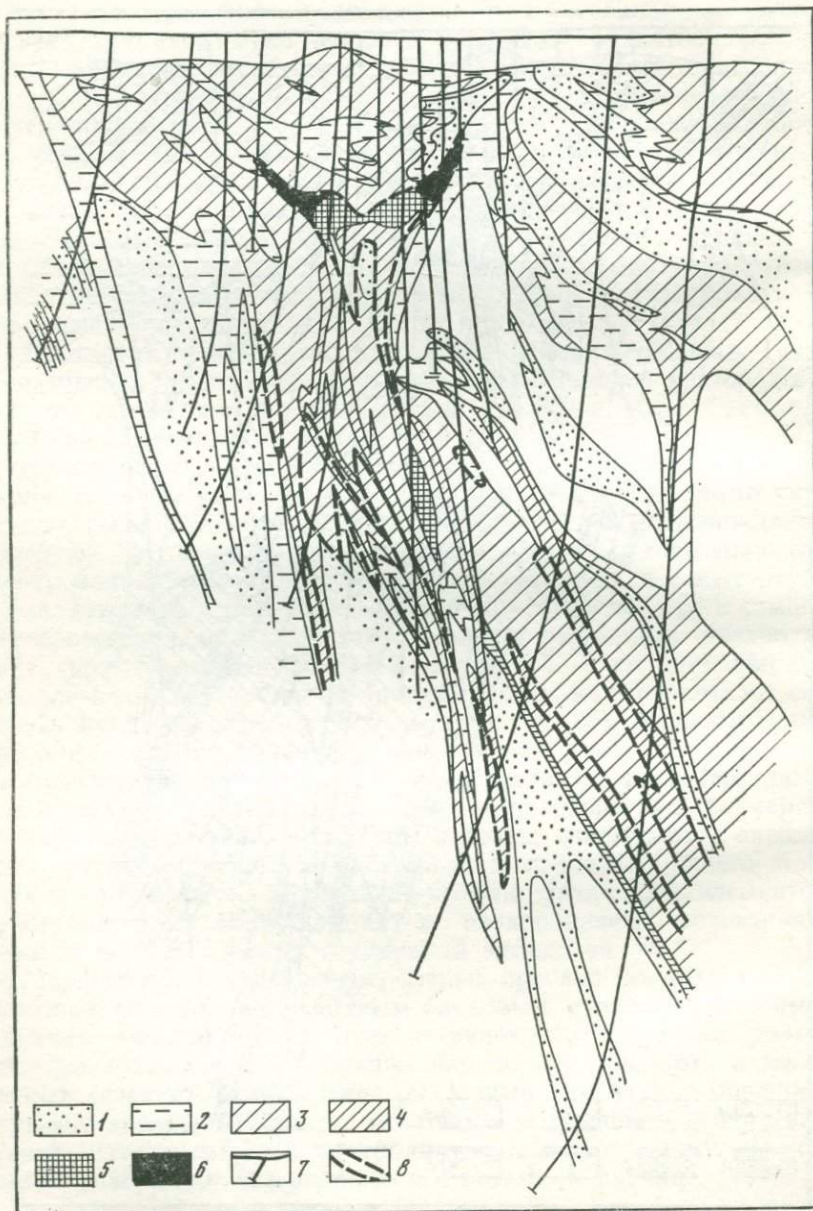
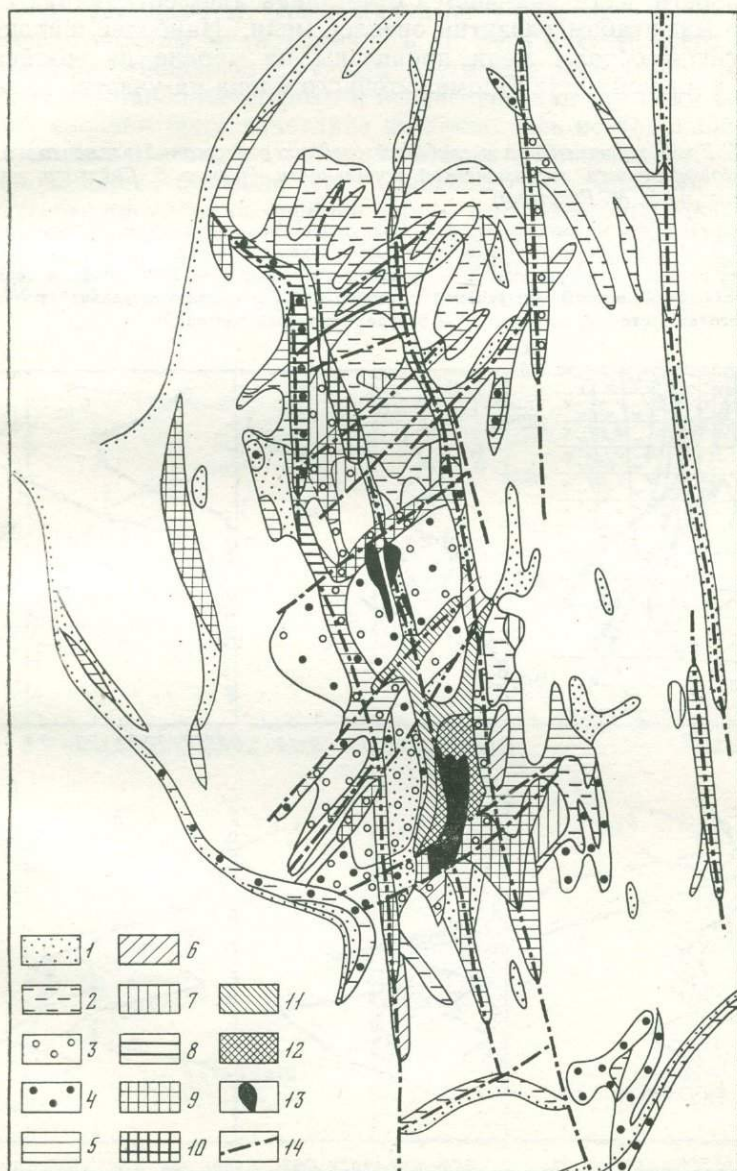


Рис. 26. Первичные ореолы на поверхности Гайского месторождения

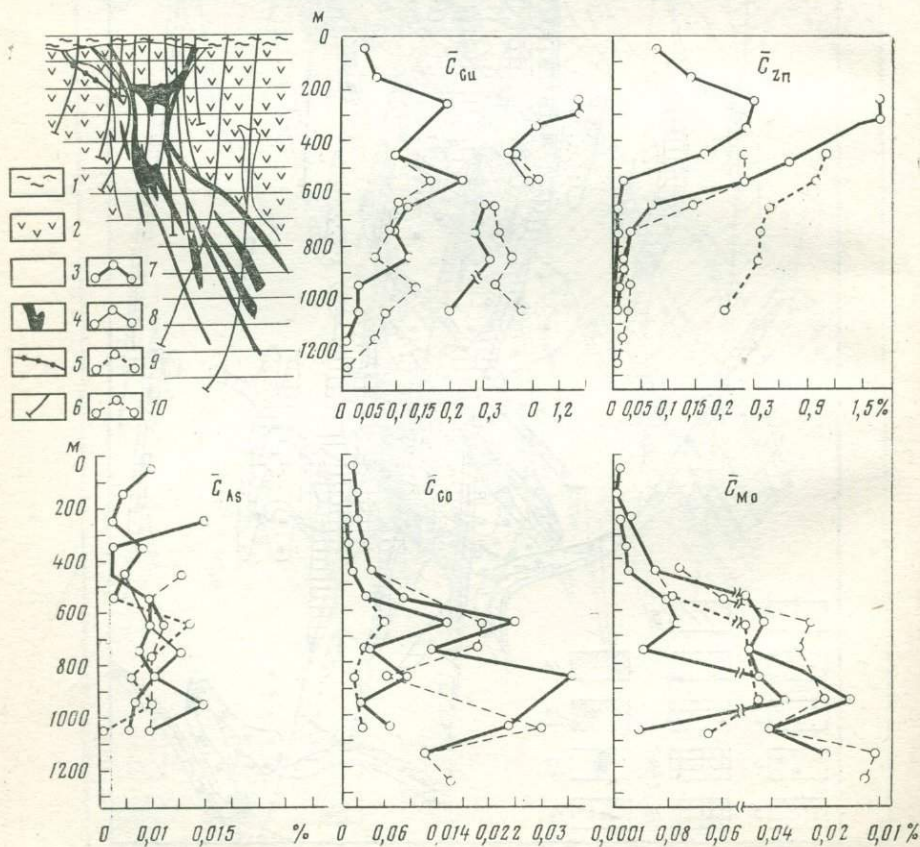
1 — 12 — первичные ореолы различных ассоциаций элементов по возрастанию интенсивности и числа элементов-индикаторов; 13 — рудные тела; 14 — зоны разрывных нарушений



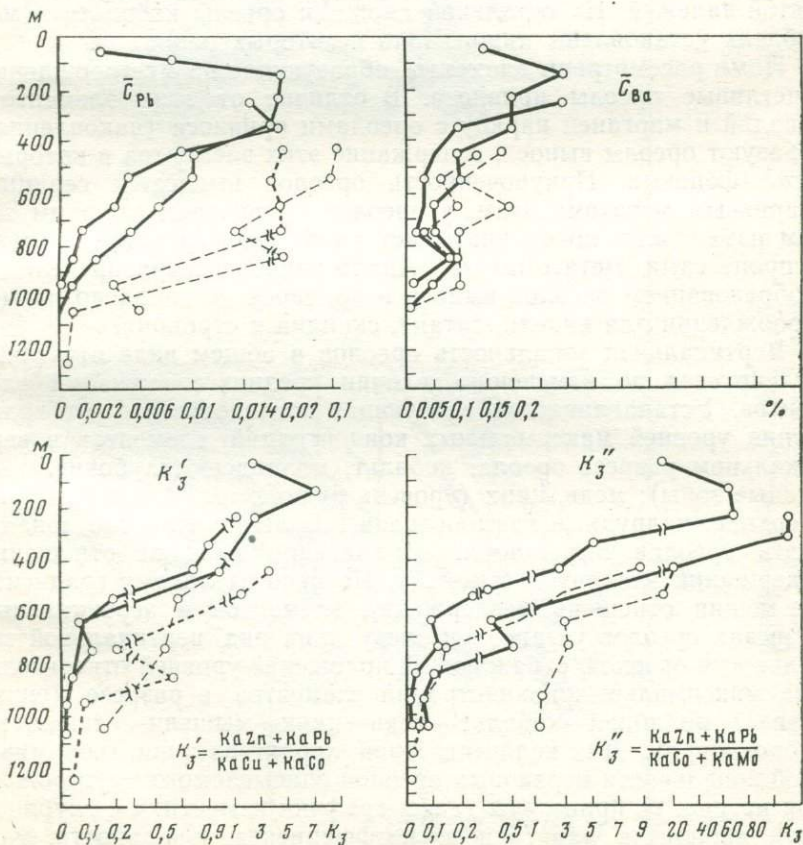
морфологический тип ореола месторождения. Но определяющее влияние на локализацию ореолов и их морфологию оказывали крутопадающие нарушения, которые обусловили линейную (в общем виде) форму ореолов и их значительную вертикальную протяженность. При общности основных закономерностей локализации и строения первичных ореолов отдельных элементов, для каждого из них устанавливаются и свои определенные особенности. Устанавливается отчетливая дифференциация блоков по масштабам развития ореолов меди. Наиболее широко и интенсивно ореолы меди проявлены на уровне палеозойских пород в южной части Промежуточного блока на участке выхода

Рис. 27. Графики изменения с глубиной средних содержаний элементов и величин коэффициента геохимической зональности (разрез 5 Гайского месторождения, по В. М. Рыфину)

1 — мезо-кайнозойские отложения; 2 — надрудная толща вулканитов базальтоидного состава; 3 — метасоматиты и гидротермально-измененные породы; 4 — рудные тела; 5 — зона разрывных нарушений; 6 — буровые скважины; 7 — 10 — графики средних содержаний (7 — ореолы центральной подзоны; 8 — в рудах центральной подзоны; 9 — в ореолах восточной подзоны; 10 — в рудах восточной подзоны)



Пятой залежи. Значительное развитие ореолов установлено в южной части Северного блока, где рудные тела Третьей залежи залегают на глубине 100—300 м. А вот в северной части Северного блока, где рудные тела встречены на глубинах 1 км и более, на поверхности выявлены лишь узкие линейные ореолы вдоль нарушений. Важно отметить, что кварцевые липарито-дациты, экранирующие рудную залежь по восстанию, для ореолов меди проницаемы. Ореол цинка по морфологии и размерам близок к ореолам меди, отличаясь от него прежде всего асимметрией по отношению к рудным телам: первичные ореолы цинка развиты наиболее широко и интенсивно над рудными телами и в их висячем боку, отчетливо выклиниваясь по падению ниже рудных тел и в породах лежащего бока (см. рис. 25). Это и обуславливает большие (по сравнению с ореолами меди) масштабы проявления ореолов цинка на уровне выхода палеозойских пород. Другой отличительной чертой распределения цинка в околорудном пространстве является отсутствие его аномальных концентраций или их низкая интенсивность в сери-



цит-кварцевых породах и кварцитах в центральных частях ореола метасоматитов.

Первичные ореолы свинца, серебра и бария, помимо относительной локальности своего проявления, характеризуются резко выраженным преимущественным накоплением в надрудных зонах. Участки максимальных концентраций этих элементов в отличие от меди и цинка, могут находиться вне колчеданных рудных тел, располагаясь в их висячем боку или над ними, по восстанию рудовмещающих структур. Первичные ореолы кобальта и молибдена по особенностям распределения в вертикальном разрезе противоположны ореолам свинца, серебра и бария: их размеры и интенсивность резко возрастают в подрудных и центральных сечениях рудной зоны в кварц-серицитовых метасоматитах, где ореолы свинца, серебра и бария практически отсутствуют. Подрудная специализация кобальта и молибдена в ореолах обусловила и резко отличное (от ореолов рассмотренных выше элементов) распределение их ореолов на уровне выхода палеозойских пород: ореолы их развиты только в Промежуточном блоке около Второй (серноколчеданной) и Пятой залежей. На остальной площади ореолы кобальта и молибдена установлены лишь вдоль некоторых разломов.

Нами рассмотрены элементы, образующие на месторождении отчетливые ореолы привноса. В отличие от этих элементов, ванадий и марганец наряду с ореолами привноса (накопления) образуют ореолы выноса, содержание этих элементов в которых ниже фоновых. Приуроченность ореолов выноса к серицит-кварцевым метасоматитам, а ореолов привноса к внешним зонам измененных пород указывает на их формирование в связи с процессами метасоматоза. Аналогичное перераспределение с образованием ореолов выноса и привноса установлено на месторождении для никеля, титана, скандия и стронция.

Вертикальная зональность ореолов в общем виде отчетливо фиксируется по изменению величин средних содержаний элементов. Устанавливается следующая последовательность положения уровней максимальных концентраций элементов в вертикальном разрезе ореола: кобальт, молибден (глубокие, подрудные зоны); медь, цинк (уровень рудных тел); свинец, барий (верхние, надрудные зоны ореолов). Более контрастно зональность ореолов выражается в изменении величин отношений содержаний элементов (рис. 27). По относительному градиенту изменения отношений содержаний элементов в вертикальных разрезах ореолов установлен следующий ряд вертикальной зональности ореолов, отражающий положение уровней относительных максимальных концентраций элементов в разрезе (снизу вверх): молибден—кобальт—медь—цинк—мышьяк—свинец, серебро—барий. Для количественной характеристики геохимической зональности первичных ореолов описываемого месторождения на рис. 27 приведены также графики изменения с глубиной двух вариантов аддитивного коэффициента зональности. Как

Рис. 28. Геологический разрез и распределение аномальных концентраций элементов в вертикальном поперечном разрезе через центральную часть Золотушинского месторождения (по А. А. Головину)

1 — осадочные породы; 2 — кварцевые порфиры; 3 — лавобрекчии кварцевых порфиров; 4 — туфы кислого состава; 5 — субвулканические кварцевые порфиры; 6 — дайки; 7 — разломы; 8 — микрокварциты и хлорит-кварцевые породы; 9 — хлоритолиты; 10 — рудные тела; 11 — 13 — первичные ореолы (13 — поля максимальных концентраций)

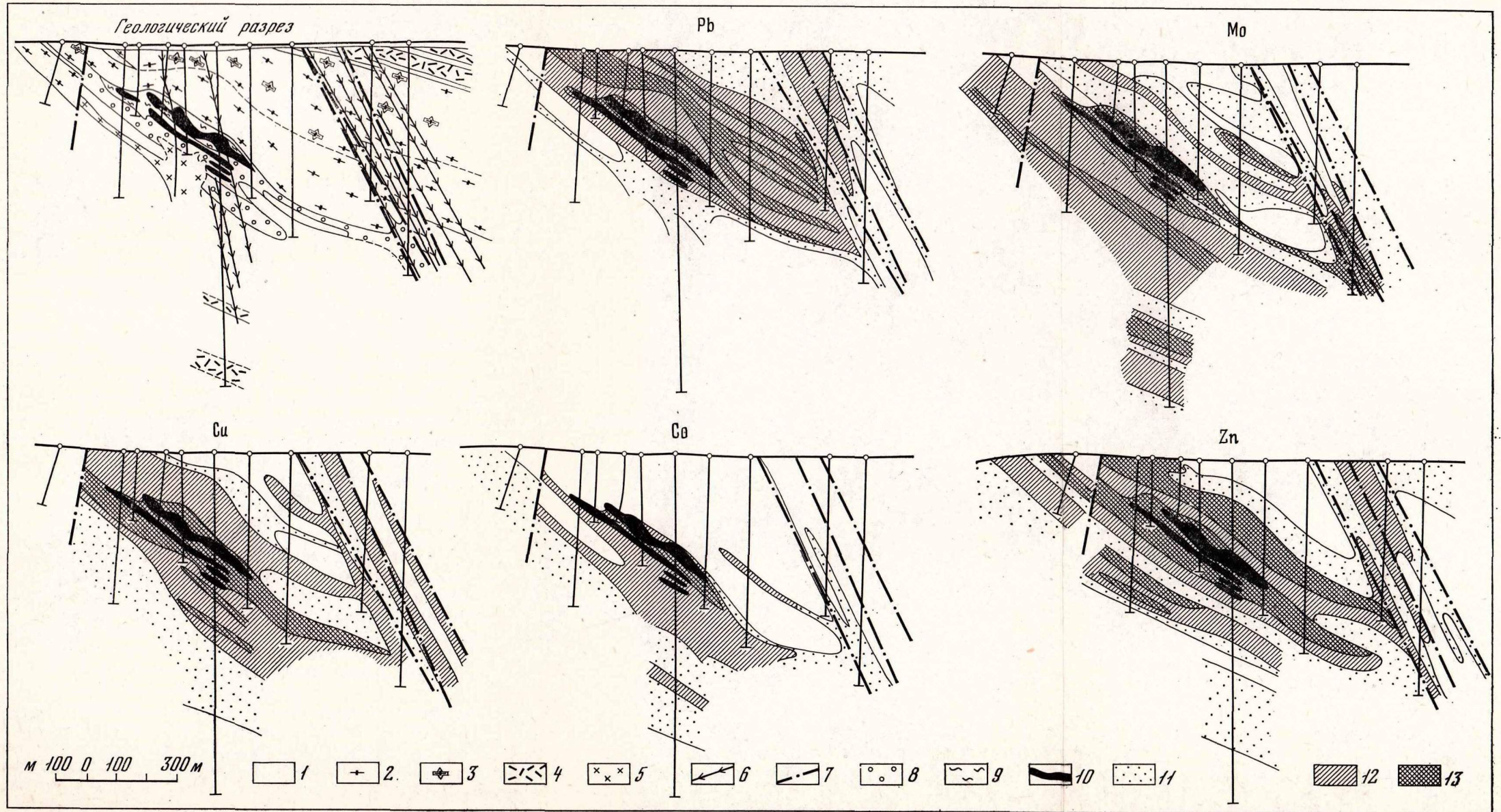
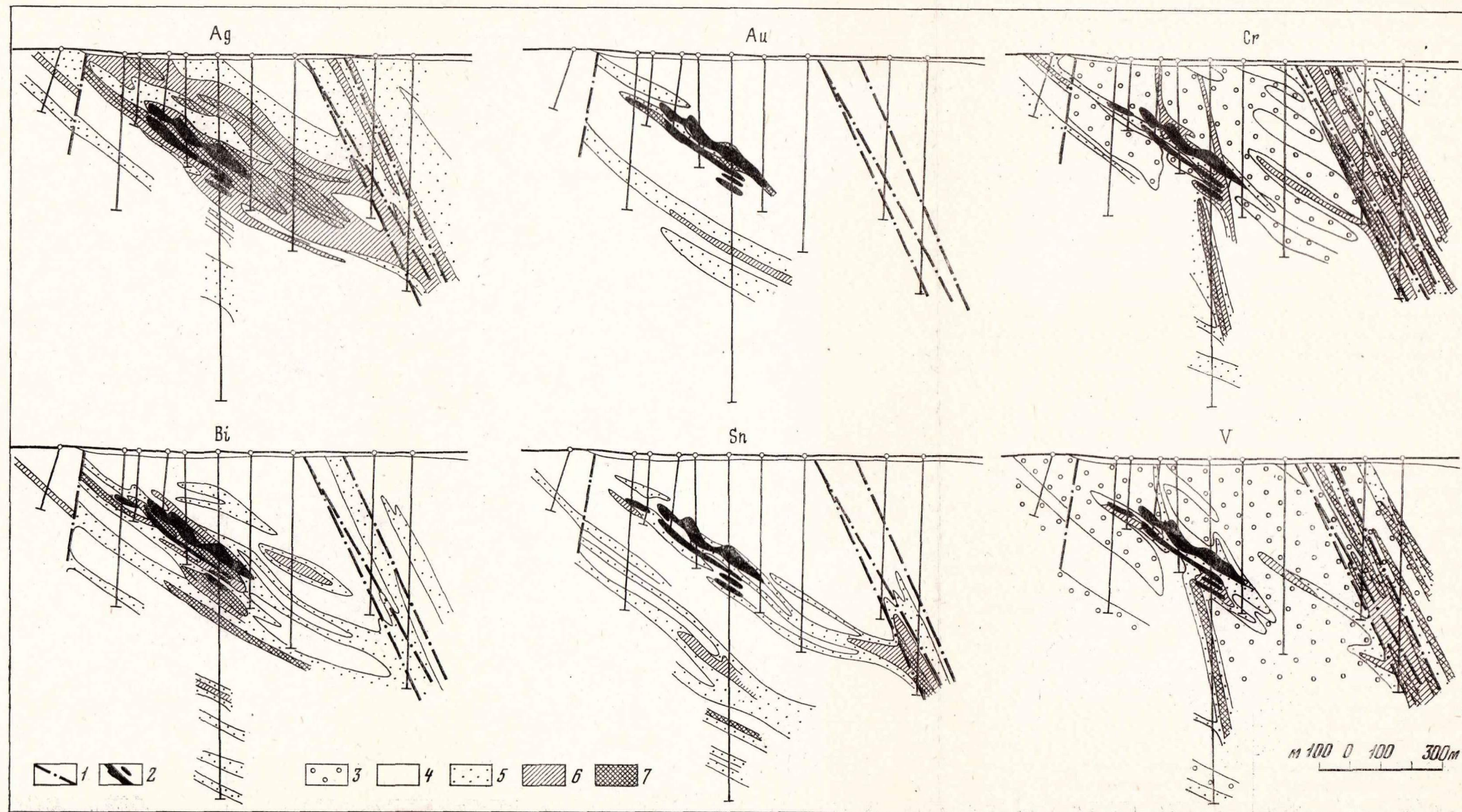


Рис. 29. Распределение аномальных концентраций элементов в вертикальном поперечном сечении через центральную часть Золотушинского месторождения (по А. А. Головину)

1 — разломы; 2 — рудные тела; 3 — 7 — первичные ореолы (7 — поля максимальных содержаний)



следует из рис. 27, величины этих коэффициентов закономерно изменяются от 0, 0_п — 0, п в нижних, тыловых зонах ореолов до п·10 — п·100 в верхних, внешних и являются показателями уровня пересечения ореола. Отметим, что выбранный коэффициент не является оптимальным по следующим соображениям: в коэффициенте использовано крайне ограниченное число элементов и, кроме того, коэффициент является аддитивным, который, в отличие от мультипликативных, выявляет менее контрастную зональность [30]. Тем не менее, как следует из рис. 27, в строении первичных ореолов с помощью этого коэффициента выявляется достаточно контрастная геохимическая зональность, которая в случае необходимости может быть резко увеличена путем использования мультипликативных коэффициентов более высоких порядков.

Золотушинское месторождение

Золотушинское колчеданно-полиметаллическое месторождение расположено в пределах одноименного рудного района в северо-западной части Рудного Алтая. Месторождение локализовано в пологопадающем ($\angle 30-45^\circ$) крыле антиклинали, осложненном мелкими флексурными складками и разбитом северо-западными и субширотными разломами, ограничивающими рудовмещающие блоки пород. Линзы, гнездообразные, линзовидные, трубообразные и штокверковые рудные тела месторождения залегают на глубине 0—450 м от поверхности коренных пород. Они локализованы в мелких флексурных складках, межпластовых срывах, зонах расланцевания и брекчирования в области контакта отложений березовской свиты (переслаивающиеся аргиллиты, алевролиты и туфы кислого состава) с перекрывающими лавами и лавобрекчиями липаритов таловской свиты. В рудах, помимо меди, свинца и цинка с характерным для колчеданно-полиметаллических месторождений средним соотношением 1 : 0,7 : 2,3 присутствуют серебро, барий, висмут, мышьяк, золото, селен, теллур, кобальт, кадмий и др. Рудная зона Золотушинского месторождения мощностью 50—200 м сложена расланцованными и будинированными преимущественно хлоритовыми метасоматитами, включающими рудные тела различного состава и формы. Руды представлены серноколчеданными, медными и медно-цинковыми (лежачий бок рудной зоны), медно-цинковыми и колчеданно-полиметаллическими (средние горизонты и центральная часть), полиметаллическими и барит-полиметаллическими разностями (висячий бок и северная часть месторождения).

Пологозалегающие геохимические ореолы Золотушинского месторождения имеют комплексный состав (рис. 28) и относятся к открытому (сквозному) типу, широко развиваясь как в вулканогенно-осадочных породах березовской свиты, так и в перекрывающих вулканитах таловской свиты. В общем контуре

комплексного первичного геохимического ореола Золотушинского месторождения наиболее широко развиты поля аномальных концентраций молибдена, цинка, меди, свинца, для которых характерны максимальные размеры, наибольшая интенсивность и максимальные величины продуктивностей (см. рис. 28). Ореолы этих элементов широко развиты во многих зонах комплексного ореола, образуя как бы его внешнюю зону, что очевидно, соответствует колчеданно-полиметаллическому типу руд Золотушинского месторождения. По размерам, интенсивности и продуктивности промежуточное положение занимают ореолы висмута, серебра и кобальта (рис. 29). Подчиненное положение занимают ореолы золота, олова, кадмия, мышьяка, никеля, ртути, бария и вольфрама.

Распределение ванадия, хрома и марганца отличается от распределения других элементов. Минимальные (пониженные по сравнению с фоном) концентрации ванадия, хрома и марганца выявлены в пределах рудовмещающего блока пород, а зоны положительных аномальных концентраций этих элементов выявлены в периферической части ореола, в удалении от рудной зоны, в участках дробления внутри рудной зоны, а также в зоне Дайкового разлома.

Комплексный ореол месторождения в плане имеет близкую к изометричной форму, развиваясь в рудовмещающем блоке пород, ограниченном субширотными и северо-западными разломами. Зона комплексного состава на поверхности коренных пород прослеживается в стороне от проекции рудных тел и контролируется контактом отложений березовской и таловской свиты. Эта особенность характерна для ореолов пологозалегающих рудных тел, локализованных в крыльях складок. В разрезе комплексный ореол (см. рис. 28 и 29) Золотушинского месторождения имеет столбовобразную форму, ограничиваясь по падению и восстанию крутопадающими разломами. Особенностью ореола, характерной для всех открытых ореолов, является симметричное (относительно рудных тел) развитие в сторону всячего и лежащего боков. Поля высоких концентраций элементов имеют линзовидную форму и развиваются согласно с рудными телами и вмещающими породами. Для описываемого ореола характерны значительные размеры: мощность ореола в вертикальном сечении в 10—12 раз больше суммарной мощности рудных тел, площадь ореола более, чем в 2 раза больше площади горизонтальной проекции рудных тел. Прослеженная вертикальная протяженность ореолов над рудными телами составляет 150—300 м.

В пределах контура ореолов аномальные концентрации элементов распределены неравномерно. Максимальные концентрации цинка, меди, свинца, молибдена, висмута, серебра, кобальта, мышьяка, кадмия, золота приурочены к уровню локализации рудных тел постепенно убывая в стороны от рудной зоны, хотя для висмута, кобальта и молибдена сопоставимые

с рудными телами величины концентраций отмечаются в лежащем боку рудовмещающей пачки пород. Максимальные концентрации олова, никеля, вольфрама отмечены только в подрудных, а бария — только в надрудных зонах ореолов. Это определяет асимметричную зональность комплексного ореола Золотушинского месторождения, которая проявлена по склонению (с северо-запада на юго-восток), по падению с запада на восток и по мощности (сверху вниз) рудной зоны. Наиболее контрастно зональность прослежена вкрест мощности рудной зоны. В указанных направлениях уменьшается относительный вес аномальных концентраций свинца, серебра, бария, кадмия, ртути и возрастает — олова, вольфрама, висмута, кобальта, золота и никеля. Молибден, цинк и медь являются ведущими элементами многих зон, хотя их относительные количества не остаются постоянными на рудных уровнях ореолов: молибден и медь более развиты в тыловых частях ореола, а цинк — во фронтальных. Указанные различия в распределении элементов на разных уровнях ореолов хорошо подтверждаются соотношениями концентраций, площадей ореолов и площадных продуктивностей, а также распределением величин парных соотношений концентраций или продуктивностей.

Осевая геохимическая зональность первичных ореолов месторождения характеризуется следующим рядом элементов (от подрудных сечений к надрудным):

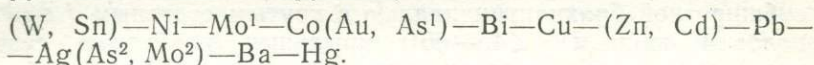
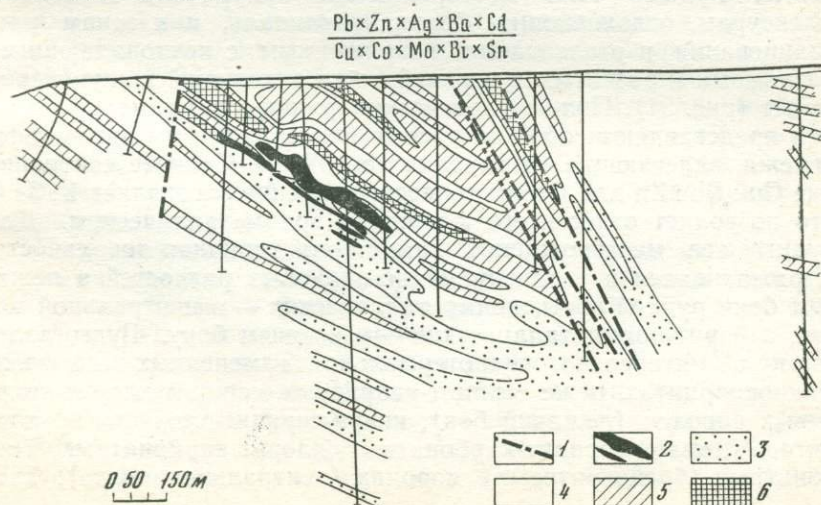


Рис. 30. Распределение величин мультипликативного коэффициента зональности в вертикальном разрезе ореола Золотушинского месторождения (по А. А. Головину)

1 — разломы; 2 — рудные тела; величины коэффициента: 3 — менее $1 \cdot 10^{-3}$, 4 — $1 \cdot 10^{-3}$, 5 — $1 \cdot 10^3$, 6 — более 10^3



Различие в параметрах разных элементов в надрудных и подрудных зонах ореолов используется, как известно, в практике геохимических поисков для определения положения рудных тел (рудной зоны) относительно уровня пересечения ореола. На описываемом месторождении это выражается в развитии в подрудных зонах интенсивных ореолов меди, кобальта, молибдена, висмута, олова, а в надрудных — ореолов свинца, цинка, серебра, бария и кадмия. Наиболее контрастно зональное строение ореолов отражает мультипликативный коэффициент зональности, величина которого на Золотушинском месторождении меняется от $1-3 \cdot 10^5$ в надрудной зоне ореола до $7 \cdot 10^{-7}-0,1$ — в подрудной зоне, т. е. на 12 порядков. Как следует из рис. 30, отмеченная выше осевая геохимическая зональность в строении первичных ореолов Золотушинского месторождения отчетливо проявляется в строении ореолов, оконтуренных по величине мультипликативного показателя, который представляет собой рассчитанное в каждой пробе отношение произведений содержаний надрудных и подрудных элементов.

Степное месторождение

Степное полиметаллическое месторождение расположено в Рубцовском рудном районе в пределах одноименной синклинали в северо-западной части Рудного Алтая. Синклиналь осложнена субширотной брахиантиклиналью с крутым северным ($\angle 80^\circ$) и пологим южным ($\angle 45-65^\circ$) крыльями, разбитыми северо-западными и субширотным разломами, определяющими блоковое строение месторождения. Разрез сложен чередованием алевропелитов, туффилов и туфов кислого состава в верхней части отложений вулканогенно-осадочной шипуновской свиты, перекрываемой кислыми вулканогенными породами давыдовской свиты. Рудные тела месторождения приурочены к мелким флексурам, осложняющим брахиантиклиналь, и к зонам расланцевания и отслаивания, сопряженным с крутопадающими разломами и развитым в верхней части отложений шипуновской свиты (рис. 31). Полиметаллические рудные тела месторождения представляют собой согласные лентовидные и линзовидные залежи, залегающие на глубине 15—380 м. Среднее соотношение $Cu : Pb : Zn$ для Степного месторождения составляет 1 : 3 : 6, что позволяет отнести его к типично полиметаллическим. Для рудных тел месторождения характерна типичная зональность, выражающаяся в развитии медно-цинковых рудностей в лежащем боку рудной зоны, полиметаллических — в центральной части, а барит-полиметаллических — в висячем боку. Руды залегают в интенсивно гидротермально измененных породах: микрокварцитах, реже серицит-кварцевых, серицит-хлорит-кварцевых породах (лежащий бок), кварц-серицит-хлоритовых, хлоритовых, кварц-серицит-карбонатных, хлорит-карбонатных, карбонатных (брейнеритовых) породах (центральная часть), хло-

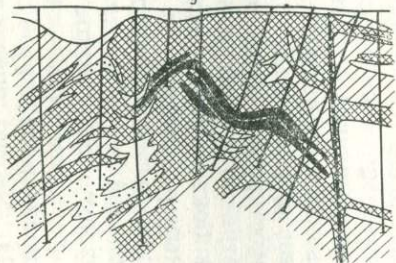
рит-серицитовых, хлорит-кварц-серицитовых (висячий бок). Помимо основных элементов руды месторождения обогащены серебром, золотом, барием, кадмием, молибденом, кобальтом, висмутом, селеном, теллуrom и мышьяком.

Первичные геохимические ореолы Степного месторождения имеют комплексный состав и по своим морфологическим особенностям относятся к пологозалегающему типу (см. рис. 31). В комплексном первичном геохимическом ореоле Степного месторождения по сравнению с описанным выше ореолом колчеданно-полиметаллического Золотушинского месторождения повышается относительная роль (увеличиваются размеры ореолов, их продуктивность) серебра, кадмия, мышьяка, бария и уменьшается — кобальта, олова, никеля, что соответствует полиметаллическому составу руд Степного месторождения. Таким образом, к числу главных элементов-индикаторов здесь можно отнести свинец, цинк, медь, серебро, кадмий и мышьяк, к числу промежуточных — золото, висмут, молибден и барий, а к числу второстепенных — кобальт, стронций, олово, никель, вольфрам, ртуть. Ванадий, хром и марганец, так же как и в ореоле Золотушинского месторождения, образуют зоны повышенных концентраций преимущественно в периферических частях рудовмещающего блока пород, нередко в зонах литологических контактов, зоне Центрального разлома. Для центральных частей рудовмещающего блока пород характерны пониженные по сравнению с фоном или близкие к фоновым концентрации этих элементов. Комплексный ореол Степного месторождения приурочен к зоне Центрального разлома, к крыльям и сводовой части брахиантиклинали, развиваясь в вулканогенно-осадочных образованиях шипуновской и эффузивно-пирокластических породах давыдовской свиты. В плане описываемый комплексный ореол имеет изометричную форму, развиваясь в рудовмещающем блоке пород, ограниченном стратиграфическими контактами и северо-западным и субширотными разломами. Зоны комплексного состава приурочены к разломам и к куполу брахиантиклинали непосредственно над рудными телами. В разрезе описываемый ореол имеет пластообразно-седловидную форму с крутым северным и пологим южным крыльями. Он симметрично развит относительно рудных тел в висячий и лежащий бока, ограничиваясь по падению крутопадающим Центральным разломом.

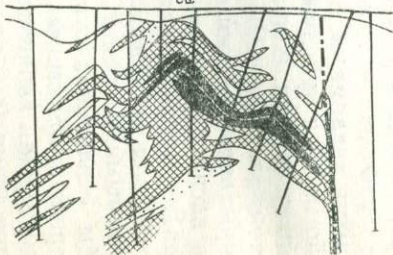
Поля высоких концентраций элементов широко развиты над рудными телами в сводовой части брахиантиклинали, имея как бы столбообразную форму. Это резкое увеличение мощности ореолов практически всех элементов в сводовой части брахиантиклинали является характерной чертой ореола Степного месторождения (см. рис. 31). Можно предположить, что указанная особенность формы ореола является следствием большей проницаемости вмещающих пород в сводовой части брахиантиклинали по сравнению с крыльями; что в свою очередь, возможно,



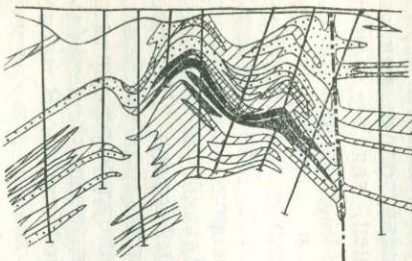
Ag



Cd



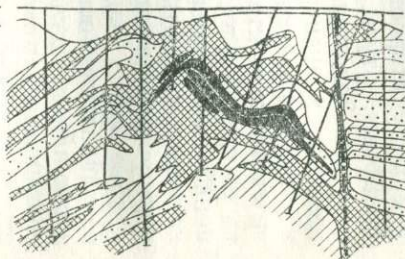
Ba



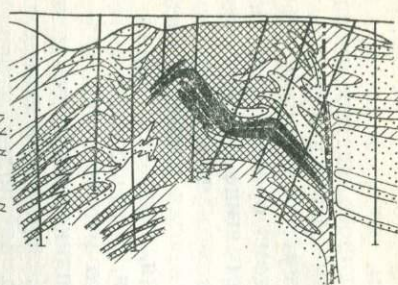
As



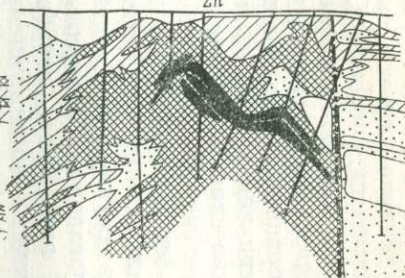
Cu



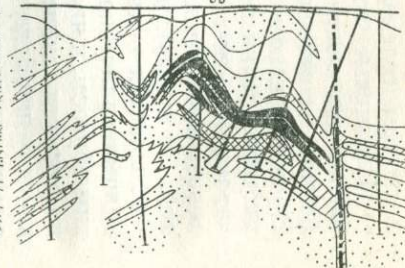
Pb



Zn



Co



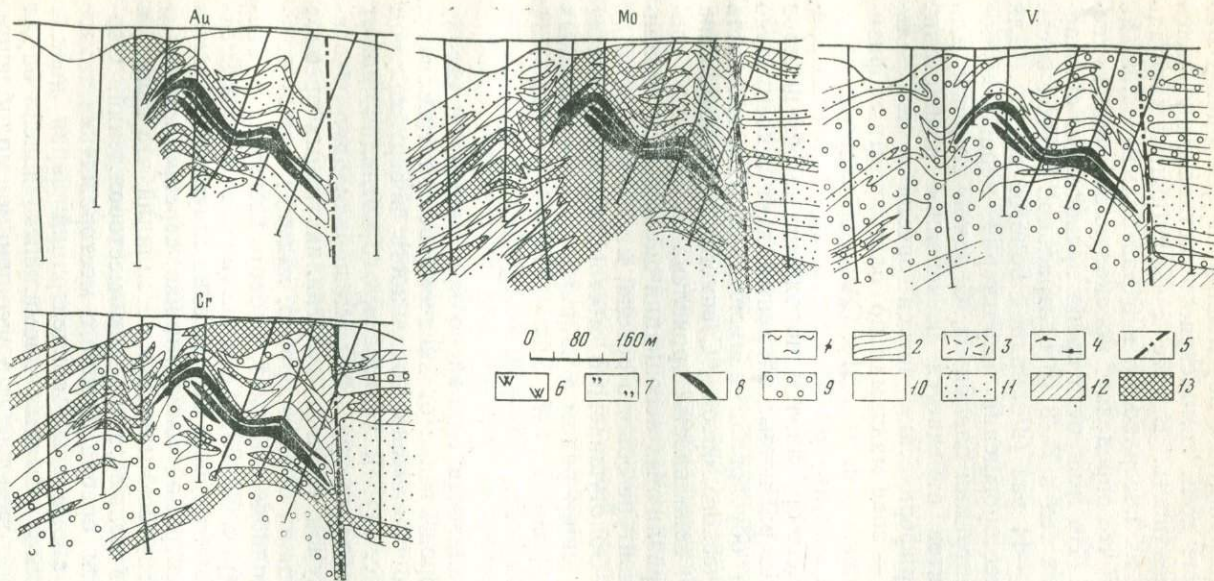


Рис. 31. Распределение аномальных концентраций элементов в поперечном вертикальном разрезе через западную часть Степного месторождения (по А. А. Головину)

1 — рыхлые песчано-глинистые отложения; 2 — алевропелиты глинистые, кремнисто-глинистые; 3 — туфы и туфолавы кислого состава; 4 — туфы кислого состава с прослоями песчаников, туфопесчаников, кремнисто-глинистых аргиллитов; 5 — Центральный разлом; 6 — микрокварциты; 7 — серицит-кварц-хлоритовые, кварцхлоритовые, серицитовые, серицит-хлорит-карбонатные породы; 8 — рудные тела; 9 — 13 — первичные ореолы (13 — поля максимальных содержаний элементов)

обусловлено преобладающим растягивающим характером деформаций в куполе брахиантиклинали. Указанная особенность ореола Степного месторождения обуславливает совпадение выявленной с поверхности зоны комплексного состава с проекцией рудных тел на поверхность. Вместе с тем общая площадь ореола, выявленного на поверхности, в 6 раз больше площади проекции рудных тел, что определяет поисковую значимость геохимических ореолов. По мощности ореол превосходит суммарную мощность рудных тел в 7—8 (в центральной крутой части структуры) или в 10—11 раз (в западной пологой части). Для ореола Степного месторождения характерно неравномерное распределение концентраций элементов. С одной стороны, для большинства элементов отмечается постепенное возрастание концентраций от периферических частей ореола к центральной — к рудной зоне — зоне максимально благоприятных физико-механических условий (см. рис. 31). С другой стороны положение относительных максимумов концентраций различных элементов в контуре общего ореола, т. е. положение как бы центров тяжести фигур ореолов различных элементов друг относительно друга различно, что обусловило асимметричную зональность первичного геохимического ореола Степного месторождения. Эта асимметричная зональность проявлена достаточно контрастно в смене зон различных ассоциаций аномальных концентраций элементов в контуре общего ореола, мало отличается от зональности ореолов Золотушинского месторождения и может быть выражена следующим рядом в направлении от надрудных зон ореола к подрудным: (W, Sn) — Mo¹ — (Ni, Co, As², Ba²) — (Au, Bi) — Cu — Zn, Cd — Pb — Ag, As¹, Mo² — Ba¹ — (Sr) — (Hg).

Описываемая зональность одинаково проявлена как сверху вниз по падению пород, так и от всячего бока к лежащему. Наиболее контрастно проявлена зональность в вертикальном направлении (см. рис. 31). В частности, это наглядно может быть проиллюстрировано контрастным смещением друг относительно друга максимумов частных мультипликативных ореолов надрудного (свинец, цинк, барий, серебро, кадмий) и подрудного (медь, кобальт, молибден, висмут, олово) комплексов элементов-индикаторов (рис. 32, 33), хотя частично в ореоле Степного месторождения зональность затушевана широким развитием аномальных концентраций свинца, цинка, серебра, кадмия и мышьяка в большинстве геохимических ассоциаций, что является особенностью ореолов полиметаллических месторождений. Особенностью зональности ореола Степного месторождения также является появление аномальных концентраций бария низкой интенсивности (помимо обычных аномальных полей бария верхних горизонтов месторождения) в ассоциации с молибденом, оловом, вольфрамом на самых глубоких горизонтах в центральной части месторождения. Вместе с тем установлено достаточно контрастное изменение величин мультипликативного коэффици-

ента зональности (K_3) в различных частях ореола. Так, если величина K_3 во фронтальных (надрудных) зонах ореола составляет $100-7 \cdot 10^9$, то в тыловых (подрудных зонах) она уменьшается до $1 \cdot 10^{-4}-10$, т. е. на 13 порядков (рис. 34).

Зональность ореола Степного месторождения осложнена ритмичностью. Она выражается в неоднократном периодическом повторении в контуре ореола его полной зональной колонны. Так, в южном крыле брахиантиклинали в центральной части месторождения (см. рис. 34) в вертикальном сечении ореола сверху — вниз отмечается двукратная смена зон фронтальных ассоциаций элементов (свинец, серебро, барий) зонами комплексного состава, а затем — зонами тыловых ассоциаций (медь, молибден, кобальт, висмут и др.). Это также проявлено ритмичной сменой высоких величин K_3 низкими величинами.

Петровское месторождение

Петровское барит-полиметаллическое месторождение расположено в южной части Змеиногорского рудного поля в северо-западной части Рудного Алтая и приурочено к южной грабен-синклинали, отделяющей Алейский антиклинорий от Быструшинского синклинория. Рудовмещающий разрез сложен кремнистыми породами и аргиллитами, подстилающимися туфами кислого состава и перекрывающимися известняками и известково-глинистыми породами березовской свиты. Породы среднего девона опущены по разломам в метасоматические сланцы. Широко развиты дайкообразные тела субвулканических липаритовых и липарит-дацитовых порфиров, дайки диабазов и габбро-диабазов. Характерно для строения Петровского месторождения близкое к вертикальному ($80-90^\circ$), запрокинутое на север падение вмещающих пород (рис. 35). В результате этого нижняя по времени образования часть отложений березовской свиты имеет более высокие абсолютные отметки, являясь висячим боком месторождения. Рудные тела месторождения приурочены к полостям отслаивания на контакте кремнистых пород с известняками и аргиллитами, к зонам трещиноватости и дробления в кремнистых породах и представляют собой межпластовые линзы и штокверковые тела столбообразной и линзовидной формы, залегающие на глубине 80 м от поверхности палеозойских пород. Среднее соотношение $Cu : Pb : Zn$ для Петровского месторождения $1 : 3 : 4 : 5 = 40$, что позволяет отнести его к типичным барит-полиметаллическим месторождениям. В рудах, помимо указанных элементов, присутствуют в заметных количествах серебро, мышьяк, а также кадмий, сурьма, селен, теллур, ванадий, золото. Характерно зональное строение рудных тел, выражающееся в смене кварц-полиметаллических разностей лежащего бока и нижних горизонтов золото-серебро-барит-полиметаллическими — в центральной части и баритовыми — в висячем боку и на верхних горизонтах месторождения.

Характерна значительно менее интенсивная (по сравнению с Золотушинским и Степным месторождениями) степень гидротермального окolorудного изменения вмещающих пород. Рудная зона развита в окварцованных породах с участками микрокварцитов (лежащий бок, нижние горизонты и центральные части зоны) и в кварц-серицитовых и серицитизированных породах (висячий бок и верхние горизонты рудной зоны). Первичные геохимические ореолы Петровского месторождения имеют комплексный состав и по своим морфологическим особенностям относятся к ореолам в крутопадающих структурах зон разрывных нарушений. По соотношению размеров ореолов, концентраций и продуктивностей к числу главных элементов-индикаторов можно отнести свинец, серебро, золото, цинк, кадмий, мышьяк, барий, к числу промежуточных — медь и молибден, а к числу второстепенных — висмут, кобальт, олово, никель (см. рис. 35). Значительная роль в ореоле Петровского месторождения таких элементов, как серебро, золото, барий, мышьяк соответствует золото-серебро-барит-полиметаллическому составу рудных тел месторождения. Так же как в ореолах описанных выше месторождений, в ореоле Петровского месторождения установлено заметное повышение концентраций ванадия, хрома и марганца лишь в периферических его частях, в зонах разломов и дайках, тогда как в рудной зоне выявлены только низкие (фоновые и ниже) концентрации этих элементов (см. рис. 35).

Комплексный ореол Петровского месторождения охватывает всю пачку среднедевонских отложений и, частично, метаморфические сланцы нижнего палеозоя. В зонах Долинного и Придорожного разломов, так же как и в дайках отмечаются аномальные концентрации практически всех элементов. Резкое ослабление концентраций серебра, свинца, молибдена, висмута, бария, кадмия, цинка отмечается в метаморфических сланцах непосредственно выше их контакта с туфами среднего девона, что позволяет сделать вывод об экранирующем влиянии этих сланцев. В плане комплексный ореол Петровского месторождения имеет линейную лентовидную и линзовидную форму, развиваясь вдоль субширотных разломов, реже вдоль стратиграфических контактов непосредственно над рудными телами. В разрезе крутопадающий ореол имеет линзовидную форму, контролирующуюся сочетанием крутых зон межслоевых срывов и дробления с разрывными нарушениями, секущими породы под острыми углами. Общая площадь ореола, выявленного на поверхности, в 3—5 раз больше площади проекции рудных тел. По мощности ореол превосходит суммарную мощность рудных тел в 10 раз.

Аномальные концентрации большинства прямых элементов-индикаторов закономерно возрастают от периферических частей ореола к центральной — к рудной зоне, что, в частности, наглядно подтверждается контрастным возрастанием величин как аддитивных, так и мультипликативных концентраций элементов (рис. 36 и 37). С другой стороны, в ореоле Петровского место-

Рис. 32. Мультипликативные ореолы надрудных элементов (свинец, цинк, серебро, барий, кадмий) в поперечном разрезе через западную часть Степного месторождения (по А. А. Головину)

1 — разломы; 2 — рудные тела; 3 — 6 — первичные ореолы различной интенсивности

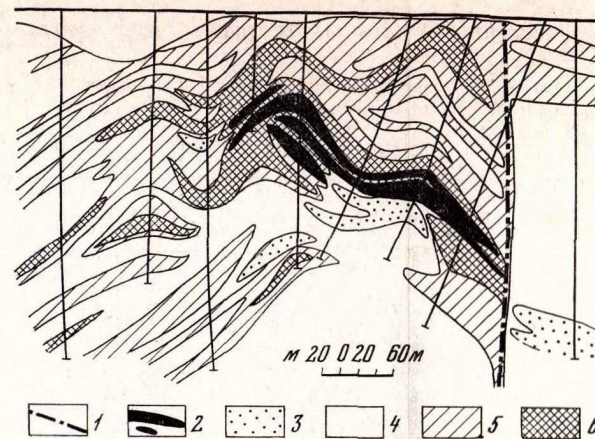


Рис. 33. Мультипликативные ореолы подрудных элементов (медь, кобальт, молибден, висмут, олово) в поперечном разрезе через западную часть Степного месторождения (по А. А. Головину)

Усл. обозначения см. рис. 32

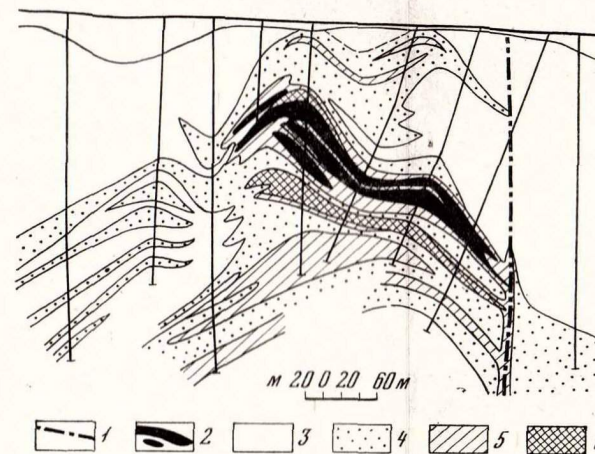


Рис. 34. Распределение величин мультипликативного коэффициента зональности в разрезе через западную часть Степного месторождения (по А. А. Головину)

1 — разломы; 2 — рудные тела; 3 — 6 — величина коэффициента зональности (3 — менее 0.1, 4 — 0.1—1·10², 5 — 1·10²—1·10⁵, 6 — более 1·10⁵)

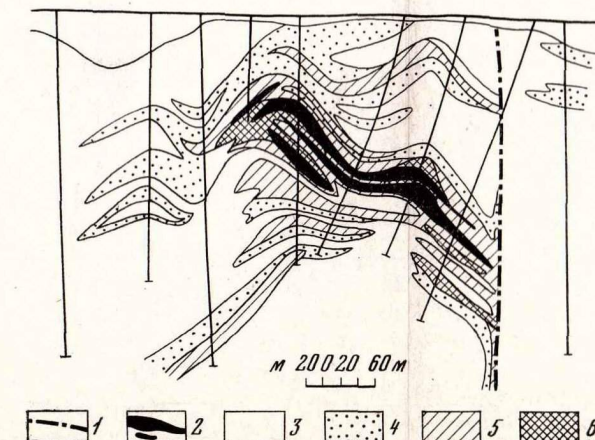


Рис. 35. Распределение аномальных концентраций элементов в вертикальном разрезе через центральную часть Петровского месторождения (по А. А. Головину)

1 — метаморфические сланцы; 2 — аргиллиты; алевролиты; 3 — туфопесчаники; 4 — туфы кислого состава; 5 — известняки; 6 — рыхлые песчано-глинистые отложения; 7 — дайки диабазов; 8 — кварциты; серицит-кварцевые породы; 9 — рудные тела; 10 — разломы; 11 — 15 — различные содержания элементов (15 — поля максимальных содержаний)

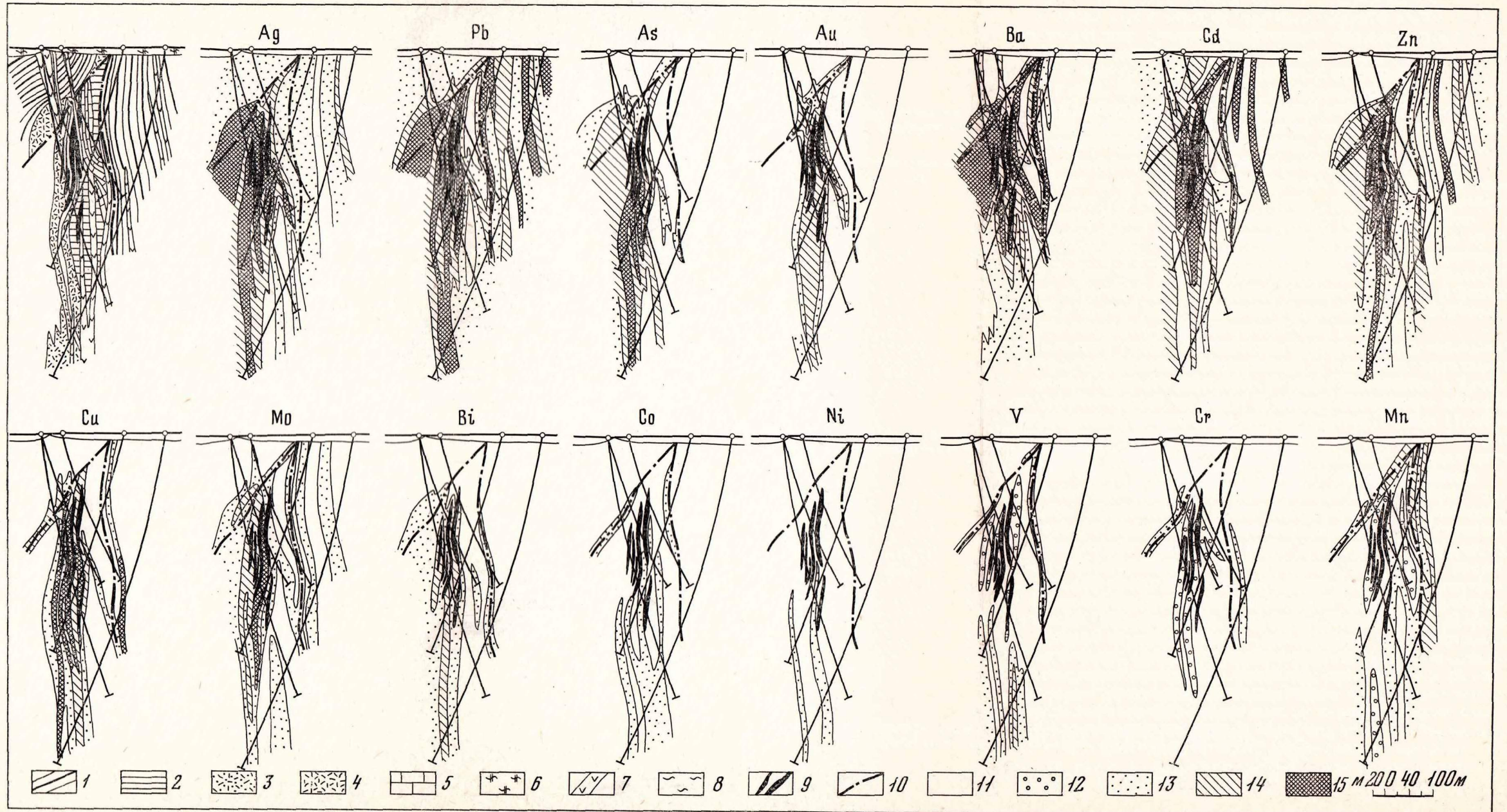
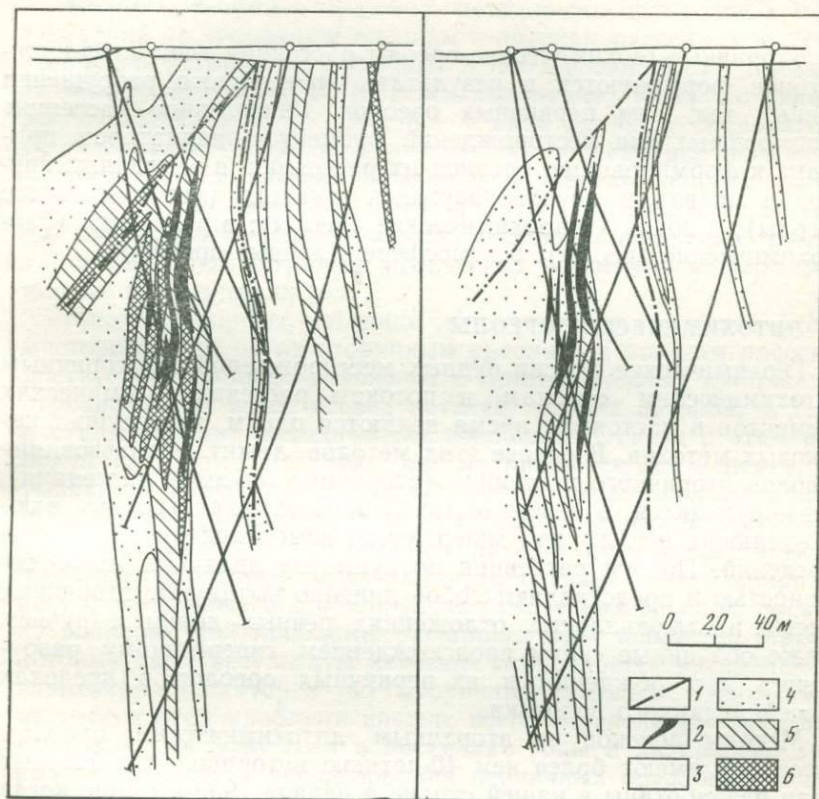


Рис. 36. Мультипликативные ореолы надрудных элементов (Pb·Zn·Ba·Ag·Col) в разрезе через центральную часть Петровского месторождения (по А. А. Головину)

1 — разломы; 2 — рудные тела; 3 — 6 — первичные ореолы различной интенсивности

Рис. 37. Мультипликативные ореолы подрудных элементов (Cu·Co·Mo·Bi·Sn) в разрезе через центральную часть Петровского месторождения (по А. А. Головину)

Усл. обозначения см. рис. 36



рождения, так же как и в ореолах описанных выше месторождений, проявлена зональность, наиболее контрастная в вертикальном направлении и выражающаяся следующим рядом от тыловых зон ореола к фронтальным: (Sn, Ni, Co) — Mo — As² — Cu¹ — (Bi, Au²) — Zn — Cd — Pb — Ag — Cu² — Au¹, As¹ — Ba, Sr. Эта зональность контрастно проявлена в смене зон различных ассоциаций аномальных концентраций элементов в контуре общего ореола. Наиболее контрастно вертикальная зональность проявлена в характере распределения величин мультипликативного показателя, уменьшающихся от 100—7·10⁵ в надрудных зонах ореола до 1—10 — в подрудных, т. е. на 6 порядков.

ВТОРИЧНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ РАССЕЙНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ИНДИКАТОРОВ ОРУДЕНЕНИЯ

Вторичные геохимические ореолы рассеяния элементов-индикаторов формируются в результате гипергенного разрушения рудных тел и их первичных ореолов. Гипергенное рассеяние типоморфных для месторождений элементов-индикаторов приводит к формированию ореолов их рассеяния в различных средах: в почвах и почвообразующих породах (литохимические ореолы); в водах (гидрохимические ореолы); в растениях (биогеохимические ореолы); в атмосфере (газовые ореолы).

ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ

Геохимические поиски рудных месторождений по вторичным литохимическим ореолам и потокам рассеяния химических элементов в настоящее время являются одним из ведущих поисковых методов. В основе этих методов лежит использование ореолов вторичного рассеяния (вторичных ореолов рассеяния), формирующихся в поверхностных образованиях (почвах, элювио-делювия и т. д.) при гипергенном изменении рудных месторождений. Потоки рассеяния по существу являются их разновидностью и представляют собой линейно вытянутые вторичные ореолы в аллювиальных отложениях речных долин и ручьев, также обязанные своим происхождением гипергенному разрушению месторождений и их первичных ореолов в пределах бассейна данного водотока.

Методы поисков по вторичным литохимическим ореолам рассеяния имеют более чем 40-летнюю историю. Они впервые были разработаны в нашей стране в начале 1930-х годов, когда основоположником этого метода Н. И. Сафроновым, а также А. П. Солововым, Е. А. Сергеевым и их последователями были сформулированы основные понятия о вторичных ореолах рассеяния элементов-индикаторов и очерчен круг поисковых задач, при решении которых могли быть использованы особенности развития вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов рудных месторождений. Некоторое представление о размахе работ по вторичным ореолам рассеяния элементов-индикаторов в нашей стране могут дать следующие цифры. Так, по данным Г. Р. Бекжанова и др., [11] только в Казахстане с 1947 по 1969 г. отобрано и проанализировано более 60 млн. металлометрических проб. Ежегодно организациями Министерства геологии

СССР отбирается 8—9 млн. проб. В становлении метода поисков рудных месторождений по вторичным литохимическим ореолам и потокам рассеяния элементов-индикаторов сыграли большую роль труды А. П. Соловова. Им составлена первая инструкция по металлометрическим съемкам, создана классификация вторичных ореолов рассеяния химических элементов, сформулированы основные положения интерпретации и количественной оценки гипергенных геохимических аномалий.

Вопросы теории и практики методов поисков рудных месторождений по вторичным ореолам и потокам рассеяния получили дальнейшее развитие в трудах Р. И. Дубова, А. Н. Еремеева, Е. М. Квятковского, В. В. Поликарпочкина, Н. Н. Сочеванова, Ю. В. Шаркова, В. З. Фурсова и ряда других исследователей. Существенный вклад в теоретическое обоснование рассматриваемых методов внесен трудами А. И. Перельмана, М. А. Глазковской, В. В. Добровольского и других, исследовавших влияние ландшафтно-геохимических условий конкретных районов на особенности миграции химических элементов и формирования их вторичных ореолов.

Многие вопросы методики литохимических поисков рудных месторождений по их вторичным ореолам и потокам рассеяния достаточно подробно изложены в многочисленных публикациях перечисленных выше исследователей, других авторов, а также в существующих методических пособиях. В связи с этим ниже более или менее детально рассматриваются два аспекта, учитывающих новейшие данные методики литохимических поисков рудных месторождений и не получивших еще достаточно полного освещения в специальной литературе. Более детально освещаются вопросы корреляции (пространственной сопряженности) первичных и вторичных геохимических ореолов, поскольку решение этой проблемы расширяет круг вопросов, ответ на которые дают результаты изучения особенностей распределения элементов-индикаторов во вторичных ореолах. Повышенный интерес к этой проблеме прежде всего определяется большими успехами, достигнутыми в последние годы в разработке научных основ метода использования первичных ореолов при поисках рудных месторождений. Значительная глубинность поисков слепого оруденения по первичным ореолам в условиях удовлетворительной корреляции первичных и вторичных ореолов обуславливает резкое увеличение поисков слепого оруденения и по вторичным ореолам, если при их интерпретации использовать критерии первичных ореолов, т. е. рассматривать вторичные ореолы в качестве адекватных аналогов первичных. Второй аспект методики вторичных ореолов также связан с проблемой увеличения глубинности поисков рудных тел и месторождений по вторичным ореолам рассеяния элементов-индикаторов. Речь идет об интенсивно развиваемой в последние годы методике поисков погребенного оруденения по наложенным (эпигенетическим) ореолам рассеяния элементов-индикаторов.

Как известно, образование вторичных ореолов рассеяния химических элементов в результате гипергенных изменений месторождений происходит в самом широком диапазоне природных условий. В качестве основных факторов здесь выступают процессы физического и химического выветривания, формирующие рыхлую толщу и преобразующие исходный первичный материал, который механическим, физическим, физико-химическим или биохимическим путем перемещается в рыхлую толщу, где закрепляется либо в виде собственных минеральных агрегатов, либо в форме различных соединений, химически или сорбционно связанных с вмещающими рыхлыми породами. По фазовому состоянию вторичные ореолы рассеяния химических элементов обычно подразделяются на механические и солевые. Механическими являются ореолы, в которых рудные компоненты присутствуют в виде твердого вещества — устойчивых в зоне гипергенеза первичных или вторичных минералов, миграция которых происходит механическим путем. Солевые ореолы формируются в результате миграции элементов в форме растворимых в природных водах соединений. Такое деление ореолов носит весьма условный характер, поскольку обычно вторичные ореолы рассеяния смешанные. В зависимости от характера вмещающей толщи и условий формирования вторичные ореолы рассеяния подразделяют на остаточные (формирующиеся по продуктам выветривания ранее существовавшего рудного тела или первичного ореола) и наложенные (в контурах которых до развития процесса ореолообразования первичная рудная минерализация отсутствовала). По степени доступности для опробования различают открытые ореолы, т. е. выходящие на современную дневную поверхность, и закрытые (погребенные) ореолы, развитые на некоторой глубине от поверхности. Таким образом, все открытые ореолы могут быть обнаружены и изучены путем опробования верхних горизонтов почв, а закрытые — путем отбора проб на уровне их надежного развития. В практике геохимических работ этот уровень получил название представительного горизонта (обычно это определенный генетический горизонт почв или рыхлых отложений) и его положение определяет глубину отбора геохимических проб.

Обобщение опыта геохимических поисков по вторичным ореолам рассеяния в различных природных зонах СССР позволило свести все разнообразие этих ореолов к определенному числу наиболее характерных типов, чаще всего встречающихся на практике.

А. П. Соловов [79] предлагает следующую классификацию наиболее часто встречаемых морфогенетических типов вторичных ореолов рассеяния (рис. 38).

I. Остаточные открытые, формирующиеся в активно денудруемых районах в современных элювиально-делювиальных отложениях.

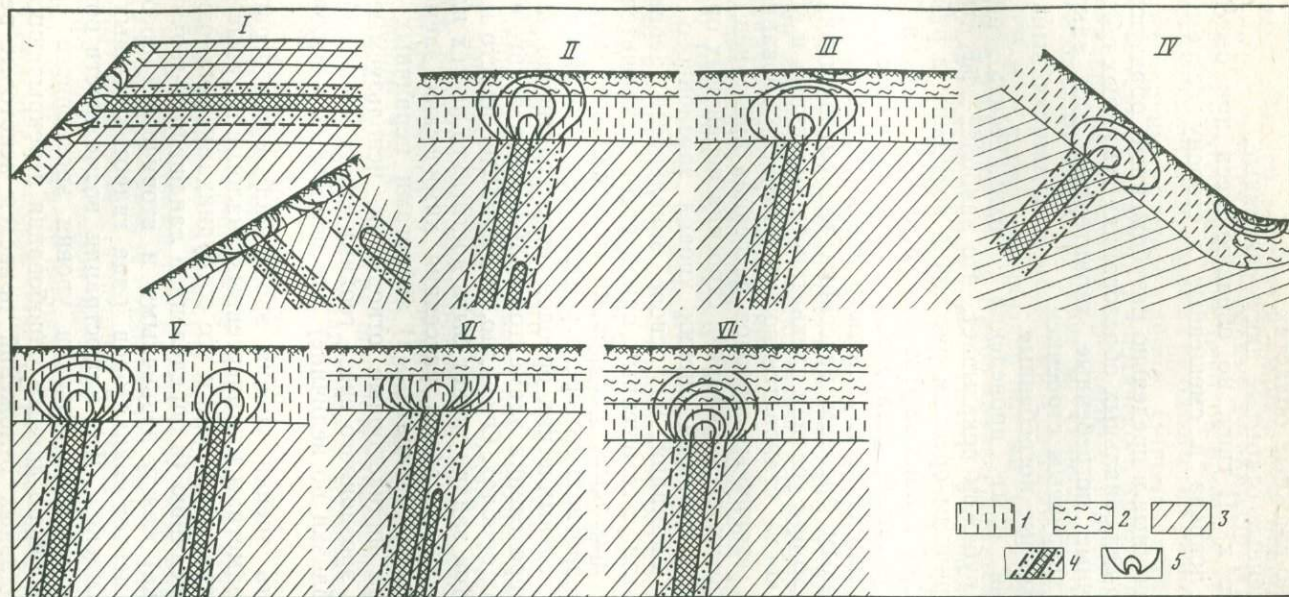


Рис. 38. Различные типы вторичных ореолов рассеяния химических элементов (по А. П. Соловову)

1 — современный элювио-делювий или древняя кора выветривания рудовмещающих коренных пород; 2 — перекрывающие отложения; 3 — коренные рудовмещающие породы; 4 — рудные тела и их первичные ореолы; 5 — вторичные ореолы рассеяния элементов-индикаторов

II. Наложенные открытые диффузионного типа, образующиеся в условиях аккумулятивно-денудационных равнин в аридных и умеренно-влажных областях.

III. Наложенные открытые аккумулятивные.

IV. Близкие к III типу, но образующиеся при отсутствии аллохтонного покрова и смещенные в сторону современного стока.

V. Выщелоченные и предельно разубоженные, образующиеся в элювиально-делювиальных образованиях гумидных областей.

VI. Остаточные погребенные, характерные для закрытых районов с двухъярусным строением.

VII. Наложенные погребенные.

Многолетний опыт проведения геохимических поисков в СССР и за рубежом показывает, что наиболее эффективные поиски по вторичным ореолам рассеяния возможны в районах, где геологические и ландшафтно-геохимические условия благоприятны для развития остаточных открытых ореолов первого типа. Резкое увеличение глубинности поисков слепого оруденения по вторичным ореолам рассеяния элементов-индикаторов возможно только при условии адекватности первичных и вторичных ореолов, когда становится возможным использование при интерпретации вторичных ореолов рассеяния критериев, вытекающих из особенностей состава и строения первичных ореолов и прежде всего критерия оценки уровня эрозионного среза геохимических аномалий на основе зональности первичных ореолов. В связи с отмеченным приобретает исключительную актуальность проблема разработки оптимальной методики оценки уровня эрозионного среза рудных тел и окаймляющих их первичных геохимических ореолов непосредственно по особенностям распределения элементов-индикаторов во вторичных литохимических ореолах. Очевидно, что наиболее просто надежное решение этой задачи может быть достигнуто на тех площадях, где вторичные ореолы рассеяния химических элементов являются полными (адекватными) аналогами первичных ореолов, т. е. когда индикаторные отношения, используемые для оценки уровня эрозионного среза геохимических аномалий одинаковы (или близки по величине) для первичных и вторичных ореолов.

Возможность оценки уровня эрозионного среза первичных ореолов по параметрам их гипергенных аналогов впервые доказана Н. Н. Сочевановым [42] и его сотрудниками, установившими тесную корреляцию (в определенной ландшафтно-геохимической обстановке) между первичными и вторичными ореолами рассеяния элементов-индикаторов ряда гидротермальных урановых месторождений. Для иллюстрации возможности обнаружения и интерпретации (оценки уровня эрозионного среза) первичных ореолов по данным опробования перекрывающих их элювио-делювиальных отложений приведем некоторые результаты изучения пространственной сопряженности первичных и

вторичных ореолов, выполненного С. В. Григорьяном и В. И. Морозовым в ряде рудных районов.

Одним из районов сравнительного изучения первичных и вторичных ореолов элементов-индикаторов полиметаллического оруденения является Центральный Карамазар (Средняя Азия), где изучение литохимических ореолов проводилось вдоль Канимансур-Алмадонского разлома — одного из основных рудовещающих нарушений этого района. Описываемый район расположен на южных склонах Кураминского хребта и представляет собой сильно расчлененное среднегорье с абсолютными отметками высот от 1400 до 2000 м. Относительное превышение отдельных вершин над местными базисами эрозии составляет 200—400 м. Склоны гор обычно крутые (15—30°), выполаживающиеся в нижней части. Район характеризуется значительной обнаженностью коренных пород. Однако в пределах зоны Канимансур-Алмадонского разлома практически повсеместно отмечается покров эллиовно-делювиальных образований мощностью от 0,5 до 2 м. Почвенный покров этой территории представлен горно-коричневыми карбонатными и типично-коричневыми, а на крутых склонах — щебнистыми маломощными почвами. Растительный покров скуден, представлен в основном злаковыми и кустарничковыми ассоциациями.

Исследования проводили по ряду профилей через первичные ореолы (опробовались канавы) на различных уровнях эрозионного среза, а также на фоновых участках. Пробы почв отбирали в тех же интервалах, в которых производили опробование коренных пород. Фракция рыхлых образований крупностью — 0,1 мм подвергнута приближенно-количественному спектральному анализу на широкий круг химических элементов, включая элементы-индикаторы типоморфного для данного района свинцово-серебряного и медно-висмутowego оруденения. Участки исследований выбраны с таким расчетом, чтобы изучить вторичные ореолы, сформированные в результате гипергенного разрушения первичных ореолов, характеризующихся различными уровнями эрозионного среза: от надрудных до подрудных. Надрудные срезы ореолов изучены на полиметаллическом месторождении Восточный Канимансур, надрудные и рудные сечения медно-висмутowego оруденения — на месторождении Каптархона, подрудные сечения медно-висмутowego оруденения — на участке Юго-Западный Алмадон.

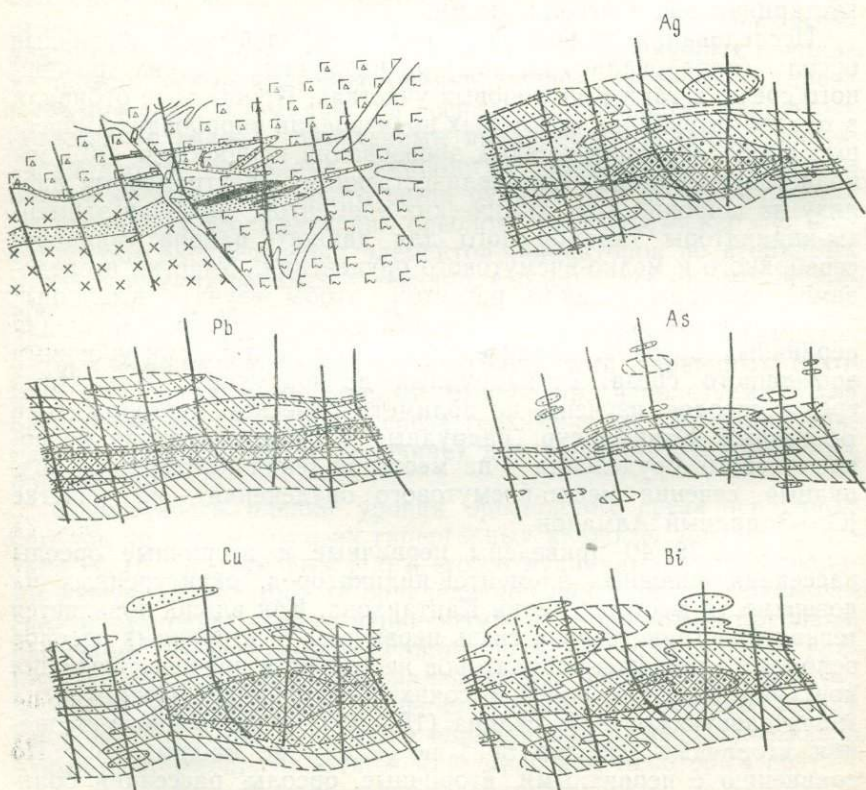
На рис. 39, 40 приведены первичные и вторичные ореолы рассеяния основных элементов-индикаторов, оконтуренных на поверхности месторождения Каптархона. Как видно, появляется тесная пространственная связь первичных и вторичных ореолов основных элементов-индикаторов не только в пределах внешних контуров, но и для полей высоких концентраций. Несмотря на значительную крутизну склона (15—30°), существенного смещения вторичных ореолов вниз по склону не наблюдается. По сравнению с первичными, вторичные ореолы рассеяния боль-

шинства элементов-индикаторов имеют несколько большие размеры и отличаются более равномерным распределением элементов в поле ореола. Приведенные данные показывают, что в условиях, аналогичных описанным выше, возможно обнаружение первичных геохимических ореолов по их гипергенным аналогам.

Для выяснения возможности и надежности использования особенностей распределения элементов-индикаторов в гипергенном поле рассеяния при интерпретации геохимических аномалий и, в частности, для определения уровня их эрозионного среза, проводили сопоставление различных параметров первичных и вторичных ореолов. Прежде всего для определения степени накопления или выноса элементов-индикаторов в процессе формирования вторичных ореолов рассеяния рассчитывали величины отношения средних содержаний элементов во вторичных и первичных ореолах, названного коэффициентом соответствия K_c .

Рис. 39. Геологическая карта и первичные и вторичные ореолы на поверхности участка Каптархона

Усл. обозначения см. рис. 40



Этот коэффициент близок к коэффициенту пропорциональности K , введенному А. П. Солововым [80]. Отличие заключается в том, что при расчете коэффициента соответствия использованы средние содержания элементов, рассчитанных в пределах постоянного интервала профиля опробования. Использование при расчете коэффициента соответствия средних содержаний элементов позволяет свести к минимуму влияние существенных флуктуаций, обусловленных прежде всего относительно низкой точностью экспрессного анализа — основного аналитического метода геохимических поисков. Значение коэффициента соответствия меньше единицы указывает на вынос данного элемента из вторичных ореолов, больше единицы — на обогащение вторичных ореолов этим элементом. В табл. 7 приведены значения коэффициента соответствия, рассчитанные по ряду профилей сопряженного опробования коренных пород и почв на участке Та-рыэкан. В скобках указаны порядковые номера в ряду элемен-

Рис. 40. Первичные и вторичные ореолы на поверхности участка Каптархона
 1 — туфы; 2 — туфолавы; 3 — фельзит-порфиры; 4 — осветление пород; 5 — рудные тела; 6 — четвертичные отложения; 7, 8 — первичные ореолы (8 — поля повышенных содержаний); 9, 10 — вторичные ореолы (10 — поля повышенных содержаний); 11 — линии геохимического опробования

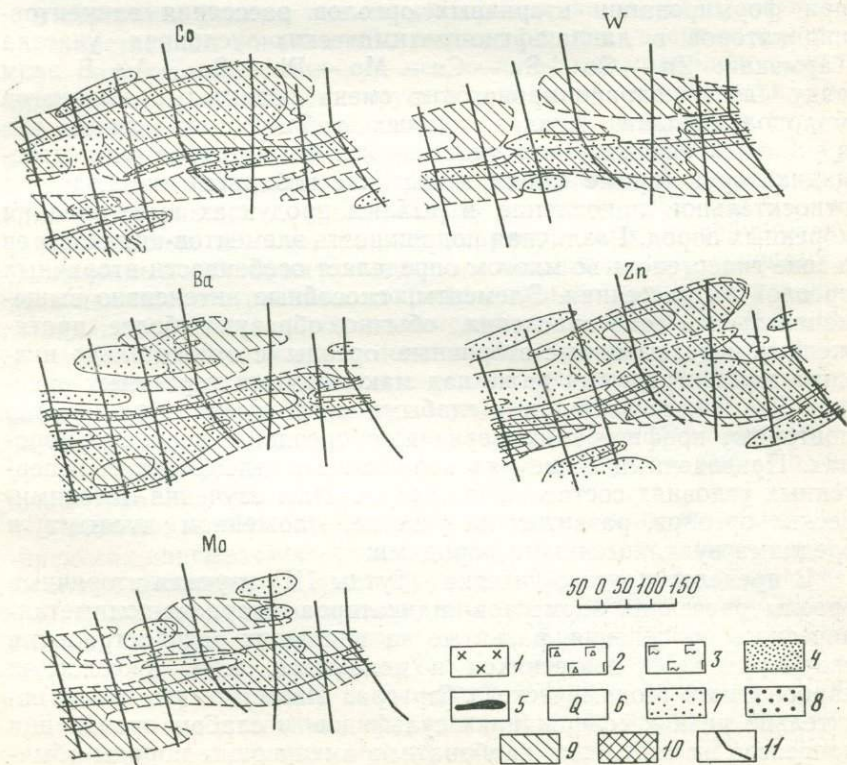


Таблица 7. Величины коэффициента соответствия первичных и вторичных ореолов

№ профиля	Co	Pb	Sn	Ba	Mo	Cu	Ag	Zn
II	0,87 (2)	3,22 (6)	1,17 (4)	9,2 (8)	1,14 (3)	1,98 (5)	3,25 (7)	0,32 (1)
III	0,8 (2)	3,59 (6)	1,83 (4)	3,43 (5)	4,18 (7)	1,68 (3)	6,91 (8)	0,42 (1)
IV	0,76 (3)	1,81 (6)	0,51 (2)	1,93 (7)	1,26 (4)	1,35 (5)	4,97 (8)	0,49 (1)
VI	2,67 (4)	3,85 (5)	1,93 (1)	14,1 (8)	5,96 (6)	2,39 (2)	9,79 (7)	2,47 (3)
VII	1,06 (4)	1,09 (5)	2,0 (8)	1,32 (7)	0,43 (1)	0,99 (3)	1,28 (6)	0,84 (2)
VIII	1,14 (2)	1,29 (4)	1,31 (5)	2,6 (6)	1,21 (3)	4,55 (7)	15,4 (8)	0,89 (1)

тов, ранжированных по возрастанию величин коэффициента соответствия.

Набор приведенных в табл. 7 элементов ограничен в связи с тем, что расчеты величин коэффициента соответствия производили только для элементов, чувствительность анализа на которые удовлетворительна. Ранжирование элементов по возрастанию средних (по всем профилям) значений коэффициента соответствия образует следующий ряд подвижности элементов при формировании вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов в ландшафтно-геохимических условиях участка Тарыэкан: Zn — Co — Sn — Cu — Mo — Pb — Ba — Ag. В этом ряду слева направо происходит смена подвижности элементов малоподвижными. Анализ данных табл. 7 показывает, что в условиях описываемого участка для большинства элементов-индикаторов (кроме цинка и частично кобальта) наблюдается относительное накопление в рыхлых продуктах выветривания коренных пород. Различная подвижность элементов-индикаторов в зоне гипергенеза во многом определяет особенности вторичных ореолов их рассеяния. Элементы, способные интенсивно выщелачиваться в зоне окисления, обычно образуют более протяженные и размазанные вторичные ореолы с относительно низкими концентрациями даже над максимумами первичных ореолов. Элементы являющиеся слабыми мигрантами, обычно четко повторяют конфигурацию первичных ореолов в коренных породах. Приведенный выше ряд подвижности элементов в гипергенных условиях составлен по результатам изучения литохимических ореолов, развитых на участке, сложенном кислыми и средними вулканогенными породами.

В пределах другого участка (Тутлы III) изучали вторичные ореолы рассеяния элементов-индикаторов скарново-полиметаллического оруденения, развитые на площадях распространения скарнированных известняков и доломитов, т. е. в условиях карбонатного геохимического барьера. Известно, что при относительно низких содержаниях сульфидов и слабом проявлении процессов их окисления карбонатные вмещающие породы обыч-

но не способствуют процессам окисления (вследствие нейтрализации образующихся кислых растворов) и поэтому процесс обычно сводится главным образом к перераспределению CaCO_3 [64]. Исследованный участок охватывает площадь скарново-полиметаллического месторождения Тутлы III — одного из месторождений Курусайского рудного поля (Рудный Карамазар, Таджикская ССР). Главной рудоконтролирующей структурой этого месторождения является Тутлинский разлом, секущий в северо-восточном направлении гранодиориты Алмабулакского массива. Рудная минерализация приурочена к двум пачкам доломитов, расположенным в зоне разлома. На контактах карбонатных пород и гранодиоритов встречаются многочисленные изометричные по форме скарновые и скарново-магнетитовые тела, мощностью от единиц до нескольких десятков метров. Рудная минерализация приурочена к зонам скарнирования и представлена прожилково-вкрапленными и агрегативными скоплениями галенита, сфалерита, халькопирита, реже висмутина, молибденита, вольфрамита и шеелита.

В пределах рудного поля повсеместно встречается рассеянная вкрапленность пирита. Вмещающие породы интенсивно хлоритизированы, серицитизированы, эпидотизированы и окварцованы.

В строении рудных тел на месторождении выявлена четкая пространственная зональность, выражающаяся в смене с глубиной полиметаллических руд медно-вольфрам-молибденовыми. Подобная зональность фиксируется и в плане, в частности, по направлению с юга на север на поверхности в пределах рудонесной зоны полиметаллическая минерализация переходит в медно-вольфрам-молибденовую. Участок расположен в зоне сочленения юго-западного продолжения Кураминского хребта с краевой частью Дальверзинской депрессии и характеризуется всхолмленным рельефом с пологими задернованными склонами. Здесь повсеместно развиты покровы рыхлых, преимущественно элювиально-делювиальных отложений мощностью от 0,8 до 2,5—4,0 м. По составу эти отложения обычно представлены песчано-суглинистым материалом с редкой щебенкой рудовмещающих коренных пород. На пологих участках в зонах скарнирования эти отложения подстилаются элювиальными карбонатными корами выветривания обломочного типа мощностью 0,3—0,5 м. Почвы горно-коричневые, карбонатные.

В результате обработки данных геохимического опробования в пределах описываемого участка оконтурены устойчивые и протяженные первичные и вторичные ореолы большой группы типоморфных для данного типа оруденения элементов-индикаторов (свинца, серебра, цинка, меди и др.). Конфигурация указанных ореолов четко контролируется разрывными структурами со скарновыми телами и сульфидной минерализацией. При этом более значительным по размерам и интенсивности первичным ореолам обычно соответствуют более широкие вторич-

ные ореолы рассеяния, т. е. и в условиях исследованного участка между первичными и вторичными ореолами намечается определенная пространственная корреляция. Однако, такая корреляция фиксируется только при незначительной мощности перекрывающих рыхлых образований (менее 1 м). При возрастании мощности перекрывающего чехла корреляции между ними ослабевает или же не фиксируется вообще. Мощность пачки карбонатных пород по простираанию зоны Тутлинского разлома варьирует в пределах от нескольких до сотен метров, причем в наиболее узких местах доломитизированные породы практически нацело замещены пироксен-гранатовыми скарнами с гранодиоритами по контактам. Эта особенность вмещающих пород позволила получить сравнительные данные о характере развития вторичных ореолов рассеяния элементов в условиях развития гранодиоритов и скарнов и на участках с преимущественным распространением доломитов (карбонатный барьер), ограничивающих активность гипергенной миграции различных элементов.

Помимо конфигурации и линейных размеров вторичных ореолов, мало отличающихся друг от друга, на участках развития разных по составу пород производили сопоставление концентраций элементов в первичных и вторичных ореолах различных элементов. Оказалось, что подвижность элементов в гипергенных процессах в пределах развития карбонатных пород и гранодиоритов существенно различна. В табл. 8 приведены ряды подвижности элементов, составленные по величинам коэффициента, соответствия, данным в скобках. Ряд подвижности элементов-индикаторов в ореолах, развитых в элювии гранодиоритов, близок (если не считать некоторые несущественные отклонения) приведенному выше ряду, составленному по участку Тарыэкан. Второй ряд свидетельствует о существенном влиянии карбонатного геохимического барьера на миграцию элементов-индикаторов. При увеличении мощности перекрывающих рудовмещающие карбонатные породы рыхлых отложений корреляция первичных и вторичных ореолов резко нарушается. На рис. 41 показаны особенности развития вторичных ореолов рассеяния ряда химических элементов и их взаимоотношения

Таблица 8. Ряды подвижности элементов-индикаторов скарново-полиметаллического оруденения

Тип рыхлых отложений	Ряды подвижности элементов
Элювий гранодиоритов	Co — Zn — Mo — Bi — Mn — Cu — Sn — W — Ag — Pb — Ba (0,75) (0,78) (0,96) (1,00) (1,2) (1,45) (2,0) (2,3) (2,36) (4,58) (10,5)
Элювий карбонатных пород	Pb — Sn — Cu — Mn — Ag — Ba — Mn — Co — Bi — Zn (0,07) (0,1) (0,17) (0,23) (0,26) (0,27) (0,4) (0,41) (0,7) (0,7)

с первичными ореолами по вертикальным разрезам через рыхлую толщу и подстилающие ее коренные карбонатные породы. Опробование коренных пород и рыхлых отложений производили по керну специально пробуренных с помощью установки УПБ-25 скважин.

Как видно из рис. 41, вторичные ореолы рассеяния части элементов до поверхности не прослеживаются и, естественно, могут быть пропущены при геохимическом опробовании поверхности. Только медь, цинк, а также не показанные на рис. 41 никель и ванадий в этих условиях могут на поверхности образовывать слабоконтрастные вторичные ореолы рассеяния, по всей вероятности, за счет биогенного накопления этих элементов в почвенных горизонтах. В табл. 9 приведены средние содержания элементов-индикаторов в различных горизонтах по вертикальному разрезу, приведенному на рис. 41. Как видно из таблицы, на фоне значительного убывания по разрезу (снизу вверх) концентраций свинца, серебра, висмута, марганца, которые при данной мощности рыхлого покрова не образуют на поверхности сколько-либо отчетливых ореолов, никель, ванадий и цинк отчетливо накапливаются в почвах в количествах, существенно превышающих их концентрации на уровне кровли коренных пород.

Рис. 41. Особенности распределения химических элементов в разрезе рыхлых отложений (участок Тутлы III)

1 — буровые скважины; 2 — доломиты; 3 — делювиальные образования; 4 — зоны дробления; 5, 6 — первичные и вторичные ореолы (6 — поля повышенных концентраций элементов-индикаторов)

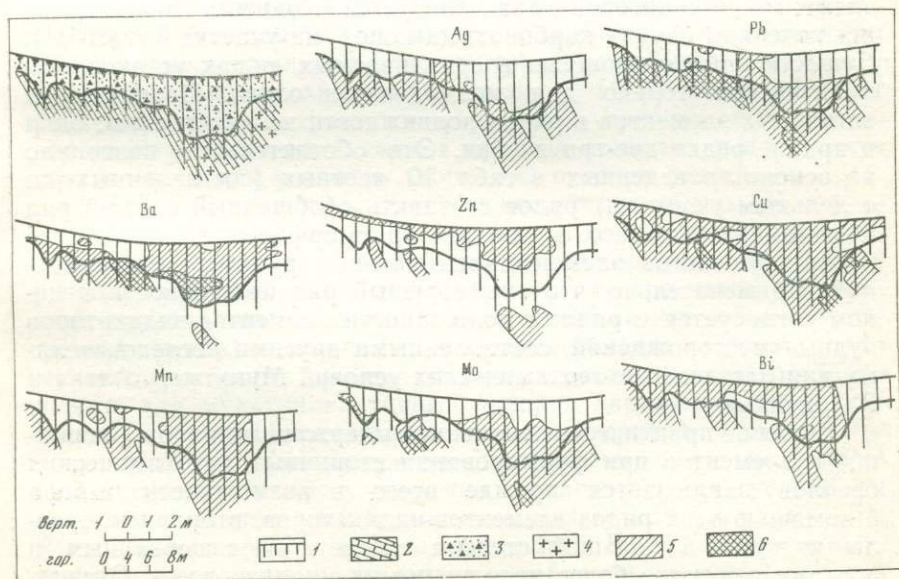


Таблица 9. Среднее содержание элементов-индикаторов в ореолах по разрезу рыхлых отложений и коренных пород (участок Тутлы-III)

Горизонт опробования	Pb, 10 ⁻³ %	Ag, 10 ⁻⁵ %	Ba, 10 ⁻² %	Mn, 10 ⁻² %	Sn, 10 ⁻³ %	Bi, ^{1,2} 10 ⁻⁴ %	Ni, 10 ⁻³ %	Zn, 10 ⁻³ %	Cu, 10 ⁻³ %	Mo, 10 ⁻⁴ %	V, 10 ⁻³ %
Почва (+2,5—4,0 м от кровли коренных пород)	4,4	3,4	4,2	8,7	0,2	0,15	5,8	13,4	10,2	0,27	7,5
Элюво-делювий (+1,0 м от кровли коренных пород)	15,2	4,4	10,5	12,3	0,1	0,3	2,1	6,2	14,9	0,45	3,6
Зона грубой дезинтеграции (в кровле коренных пород)	89,3	8,4	4,6	18,6	2	0,3	0,5	6,7	12,0	0,4	0,1
Коренные породы	32,8	7,4	11,4	—*	—	0,3	—	7,9	10,2	0,39	—

* Аномальные концентрации элементов не установлены.

Сравнительное изучение особенностей первичных и вторичных ореолов рассеяния по ряду участков, расположенных в Средней Азии и Закавказье, позволили для ландшафтно-геохимических условий исследованных районов составить ряды подвижности наиболее распространенных элементов-индикаторов рудных месторождений.

Приведенные в табл. 10 данные показывают, что в окислительной обстановке зоны гипергенеза при формировании вторичных литохимических ореолов дифференциальная подвижность элементов-индикаторов характеризуется сходными рядами, (за исключением случая карбонатных пород на участке Тутлы-III). Существенные отклонения в сравниваемых рядах установлены практически только для молибдена и олова. Перемещения остальных элементов в рядах подвижности незначительны: одна и крайне редко две-три ячейки. Это обстоятельство позволило на основе приведенных в табл. 10 частных (составленных по отдельным участкам) рядов составить обобщенный единый ряд и рекомендовать его в качестве типоморфного для наиболее распространенных элементов-индикаторов рудных месторождений. Примечательно, что типоморфный ряд подвижности в целом согласуется с рядами подвижности элементов-индикаторов рудных месторождений, составленными другими исследователями для ландшафтно-геохимических условий Мугоджар, Алтая и Забайкалья.

Большое практическое значение выдержанных рядов подвижности элементов при формировании вторичных литохимических ореолов заключается прежде всего в возможности выбора с помощью этих рядов элементов-индикаторов, вторичные ореолы которых в большей степени соответствуют первичным и поэтому являются более надежными их индикаторами. Очевид-

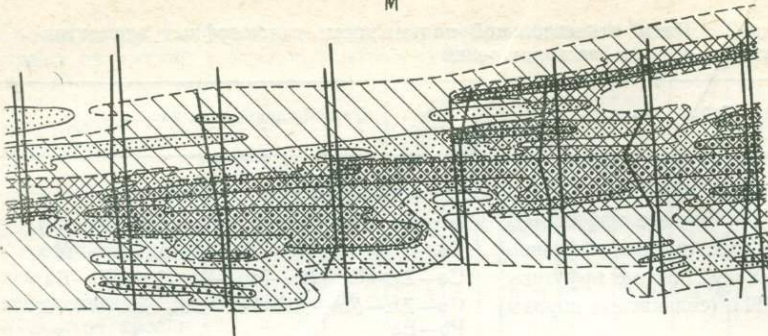
Таблица 10. Ряды относительной подвижности типоморфных элементов-индикаторов рудных месторождений

Район, участок	Ряды подвижности элементов
Средняя Азия	
Тары-Экан (кислые эффузивы)	Zn—Co—Sn—Cu—Bi—Mo—Pb—Ba—Ag
Каптар-Хона (кислые эффузивы)	Zn—Co—Cu—Sn—Pb—Bi—Ag—Ba—Mo
Кызыл-Унгур (кислые эффузивы)	Co—Zn—Cu—Bi—Mo—W—Ag—Pb—Ba
Тутлы-III (силикатные породы)	Co—Zn—Mo—Bi—Mn—Cu—Sn—W—Ag—Pb—Ba
Тутлы-III (карбонатные породы)	Pb—Sn—Cu—Mo—Ag—Ba—Mn—Co—Bi—Zn
Закавказье	
Халадж (кварцевые порфиры)	Co—Ni—Zn—As—Sn—Cu—Pb—Ag—Mo
Арманис (кварцевые метасоматиты)	Co—Zn—Ag—Mo—Pb—Cu—Ba
Обобщенный ряд	Co—Ni—Zn—As—Sn—Cu—Mo—Bi—Pb—W—Ag—Ba
Мугуджары	Mo—Zn—Cu—Pb—As—Ag
Алтай	Mn—Zn—Co—Bi—Cd—Mo—Ti—Sn—Ga—Ni—V—Cu—W—Sr—Pb—Ag—As—Ba
Забайкалье	Zn—Mo—As—Cu—Pb—W—Sn

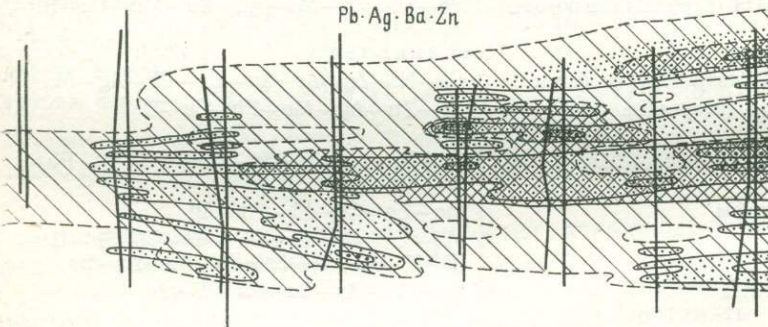
но, что такими будут элементы, находящиеся в правой части ряда и отличающиеся слабой подвижностью в гипергенных условиях. Выше отмечалось, что вторичные ореолы рассеяния элементов-индикаторов по различным причинам во многих случаях небольшие по размерам и слабые по интенсивности и эти вопросы усиления слабоконтрастных аномалий важны и для вторичных литохимических ореолов. Положительный опыт усиления слабоконтрастных первичных ореолов с помощью построения мультипликативных ореолов позволил использовать этот метод и для усиления вторичных ореолов рассеяния.

На рис. 42 приведены примеры построения общих (M — произведение всех элементов) и частных (отдельные группы элементов) мультипликативных ореолов в коренных породах и рыхлых образованиях, а также ореолы, построенные по величине мультипликативного показателя. Сравнение общих мультипликативных ореолов с моноэлементными показало, что мультипликативные ореолы более контрастны и, что особенно важно, для мультипликативных ореолов характерна более высокая степень соответствия первичных и вторичных ореолов. Это обстоятельство фиксируется как графически, так и по результатам соответствующих расчетов, в частности, по величинам коэффициента ранговой корреляции между содержаниями элементов в первичных и вторичных ореолах. Для расчетов использованы результаты анализа двух серий проб коренных пород и

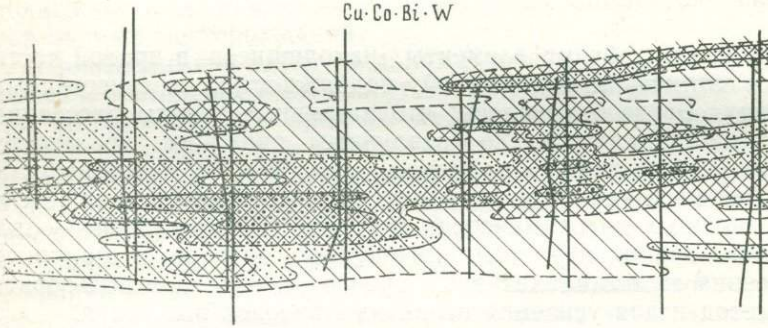
M



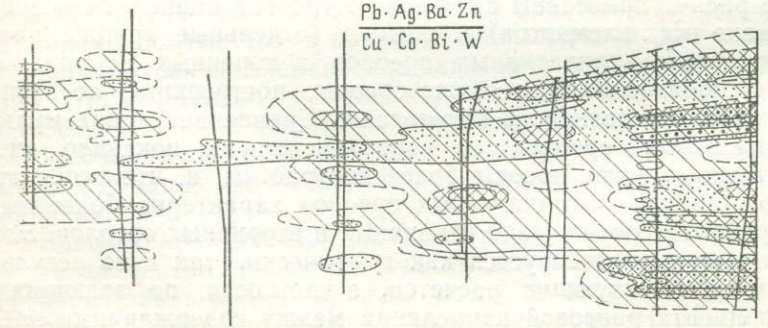
Pb·Ag·Ba·Zn



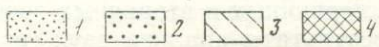
Cu·Co·Bi·W



Pb·Ag·Ba·Zn
Cu·Co·Bi·W



0 40 60M



1, 2 — первичные ореолы (2 — поля повышенных значений содержаний); 3, 4 — вторичные ореолы (4 — поля повышенных значений содержаний)

рыхлых отложений, отобранных по профилям сопряженного опробования первичных и вторичных ореолов, когда из каждого 10-метрового интервала опробования отбирались две пробы: из коренных пород и рыхлых отложений.

В табл. 11 приведены коэффициенты корреляции для моноэлементных и мультипликативных ореолов, развитых в коренных породах и перекрывающих их рыхлых образованиях. Как видно из таблицы, значимая положительная корреляция между первичными и вторичными ореолами устанавливается только для мультипликативных ореолов. Использование вторичных мультипликативных ореолов, как и в случае рассмотренных в предыдущих главах первичных ореолов, весьма эффективно также при оценке уровня эрозионного среза геохимических ореолов на основе геохимической зональности первичных ореолов. Как уже отмечалось, уровень эрозионного среза первичных ореолов определяется по величинам отношений параметров ореолов элементов-индикаторов вертикальной зональности. На рис. 43 приведены графики изменения величин отношений линейной продуктивности ореолов пар элементов, рассчитанных как по первичным, так и по вторичным ореолам по мере увеличения глубины эрозионного среза. На графике по оси ординат отложены профили сопряженного геохимического опробования коренных пород и рыхлых отложений, а по оси абсцисс — величины отношений линейных продуктивностей, рассчитанных в пределах выявленных по профилям ореолов. Выбор пар элементов, естественно, производился исходя из характера осевой геохимической зональности первичных ореолов данного типа оруденения. Для построения приведенных на рис. 43 графиков использованы результаты профильного геохимического опробования в зоне Канимансур-Алмадонского разлома на участке склонения рудной залежи. Это позволило исследовать связь

Таблица 11. Величины коэффициента корреляции

Моноэлементные ореолы						Мультипликативные ореолы	
Pb	Zn	Ag	C	Ba	Co	частные	общие
0,23	0,11	0,15	0,25	-0,01	+0,15	0,35*	0,38

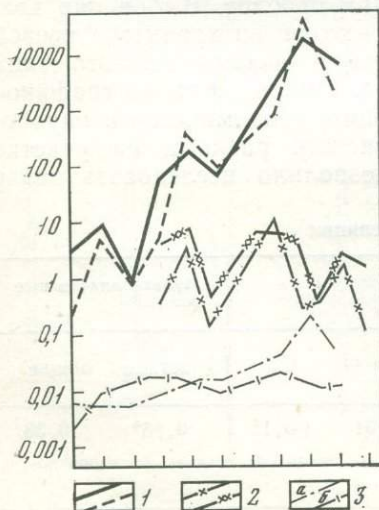
* Полужирным шрифтом даны коэффициенты со значимой связью (с вероятностью 95%).

первичных и вторичных ореолов элементов-индикаторов на разных уровнях их эрозионного среза от надрудных до типично подрудных. Отражая эту зональность, графики индикаторных отношений имеют более или менее выдержанный нисходящий вид. Как видно, по ряду пар выявляется весьма тесная корреляция между первичными и вторичными ореолами. Однако подобное соответствие величин парных индикаторных отношений выдерживается не во всех случаях. В частности, существенные расхождения наблюдаются для пары серебро — медь.

По сравнению с парными отношениями, мультипликативные проявляют более тесную корреляцию. Приведенные на рис. 43 графики изменения мультипликативного коэффициента зональности (отношение произведений линейных продуктивностей первичных и вторичных ореолов) надрудных (барий, мышьяк, серебро, свинец) и подрудных (медь, висмут, кобальт, вольфрам) элементов даже в деталях повторяют друг друга и весьма контрастно убывают от надрудных сечений ореолов к подрудным, четко дифференцируя различные уровни эрозионного среза ореолов. В данном случае использование мультипликативного коэффициента обеспечивает резкое повышение контрастности зональности. Благодаря этому на фоне значительного градиента по вертикали мультипликативного коэффициента различия индикаторных отношений в первичных и вторичных ореолах уже не столь существенны, в отличие от парных отно-

Рис. 43. Графики отношений линейных продуктивностей (парных и мультипликативных) первичных (а) и вторичных (б) ореолов

Отношения: 1 — мультипликативное, 2 — свинца к меди, 3 — серебра к меди



шений, использование которых для оценки уровня эрозионного среза вторичных ореолов рассеяния в ряде случаев практически исключается именно из-за различий в величинах индикаторных отношений по первичным и вторичным ореолам. Очевидно, чем выше степень соответствия первичных и вторичных ореолов, т. е. чем ближе величины индикаторных отношений, используемых в качестве оценок геохимической зональности, тем использование вторичных ореолов для оценки уровня эрозионного среза геохимических аномалий будет надежнее. В связи с отмеченным приобретает важное значение выбор наиболее оптимальных индикаторных отношений, т. е. таких, для которых расхождения первичных и вторичных ореолов минимальные.

При выборе наиболее эффективных для оценки уровня эрозионного среза первичных ореолов (по результатам опробования вторичных ореолов) необходимо учитывать подвижность элементов как в эндогенных (формирование первичных ореолов), так и экзогенных процессах (образование вторичных ореолов), г. е. ряды подвижности элементов: гипергенной и гипогенной (ряды осевой зональности первичных ореолов). Выбор оптимального варианта коэффициента геохимической зональности при интерпретации вторичных ореолов будет значительно облегчен, если пользоваться правилом двух рядов подвижности, которое гласит: наиболее надежным будет коэффициент зональности, в числителе и знаменателе которого использованы максимально удаленные в ряду гипогенной подвижности группы с возможно большим числом элементов, в ряду гипергенной подвижности расположенных в правой части. Данное правило требует выполнения трех условий при выборе коэффициента зональности: число элементов должно быть максимальным (для обеспечения максимальной контрастности зональности), группы надрудных и подрудных элементов должны быть расположены полярно в ряду зональности и в правой части ряда гипергенной подвижности. Для иллюстрации использования правила двух рядов подвижности вернемся к рассмотренному выше примеру сравнения различных вариантов коэффициента геохимической зональности. В табл. 12 приведены ряды гипогенной и гипергенной подвижности элементов-индикаторов полиметаллического оруденения.

В качестве ряда гипогенной подвижности использован ряд осевой зональности первичных ореолов полиметаллического месторождения Восточный Канимансур, а в качестве ряда гипергенной подвижности — приведенный в табл. 10 типоморфный ряд гипергенной подвижности типоморфных элементов-индикаторов эндогенного полиметаллического оруденения.

Приведенные на рис. 43 графики индикаторного отношения серебро — медь не выявляют тесную корреляцию по той причине, что эти элементы в приведенном в табл. 12 ряду гипергенной подвижности значительно удалены друг от друга. Установлено, что даже незначительное сближение элементов в ряду гипергенной подвижности существенно сказывается на степени соответствия параметров первичных и вторичных ореолов элементов

Таблица 12. Ряды подвижности элементов-индикаторов полиметаллического оруденения

Процесс	Ряд элементов
Гипогенный	Ba—As—Ag—Pb—Zn—Cu—Bi—Mo—Ni—Sn—Co—W
Гипергенный	Co—Ni—Zn—As—Sn—Cu—Mo—Bi—Pb—W—Ag—Ba

индикаторов. Для иллюстрации этого положения на рис. 43 приведены также графики изменения отношения для другой пары элементов: свинца и меди. Как следует из табл. 12, эти элементы в ряду гипергенной подвижности расположены всего на две ячейки ближе (по сравнению с рассмотренной выше парой серебро — медь). И это незамедлительно сказывается на характере корреляции первичных и вторичных ореолов: как следует из рис. 43, графики изменения индикаторного отношения для этой пары по первичным и вторичным ореолам практически полностью повторяют друг друга, отражая существование тесной корреляции.

Как следует из рис. 43, максимальная степень соответствия первичных и вторичных ореолов выявляется по величине мультипликативного коэффициента геохимической зональности, в котором надрудными являются свинец, барий, серебро, мышьяк, подрудными — медь, кобальт, висмут, вольфрам. На примере этого коэффициента рассмотрим регламентированные приведенным выше правилом двух рядов подвижности принципы выбора мультипликативного коэффициента зональности. В табл. 12 подчеркнуты элементы, использованные в рассматриваемом коэффициенте. Как следует из табл. 12, выбор надрудных элементов удовлетворяет обоим рядам подвижности: они занимают левый конец ряда гипогенной подвижности, и правый конец другого ряда, за исключением только мышьяка, который обладает сравнительно высокой миграционной подвижностью. В группе подрудных элементов правильнее было бы вместо меди и кобальта использовать молибден и олово. Однако эти элементы исключены из числа элементов-индикаторов в связи с тем, что их место в рядах гипергенной подвижности, как отмечалось выше, неустойчивое. Вместо них в число подрудных элементов включены кобальт и медь — эффективные индикаторы подрудных сечений первичных ореолов полиметаллического оруденения. Медь полностью подходит для коэффициента и по своей подвижности в гипергенных условиях. Этого нельзя утверждать для кобальта, первого в ряду гипергенной подвижности. Тем не менее кобальт оставлен в коэффициенте как для обеспечения высокой контрастности зональности, так и с целью компенсации влияния мышьяка, который тоже обладает высокой подвижностью. Таким образом, рассматриваемый мультипликативный коэффициент при значительном градиенте по вертикали (от надрудных до подрудных сечений) меняется в десятки миллионов раз) по величине практически одинаков для адекватных сечений первичных и вторичных ореолов и поэтому в ландшафтно-геохимических условиях описываемого района с успехом может быть использован для оценки уровня эрозионного среза геохимических аномалий (точнее, уровня эрозионного среза первичных ореолов по результатам опробования их гипергенных аналогов — вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов).

Практическое значение возможности оценки уровня эрозионного среза геохимических аномалий по параметрам вторичных ореолов трудно переоценить. Известно, что непосредственное опробование коренных пород с поверхности (для обнаружения первичных ореолов) возможно в пределах только весьма небольшой части территорий поисковых работ, так как коренные рудовмещающие породы обычно перекрыты более молодыми рыхлыми отложениями, в которых развиты вторичные ореолы рассеяния элементов-индикаторов. Возможность использования в определенной ландшафтно-геохимической обстановке осевой геохимической зональности первичных ореолов для оценки гипергенных геохимических аномалий позволяет существенно повысить эффективность получившего наиболее широкое применение метода поисков рудных месторождений по их вторичным (гипергенным) литохимическим ореолам. Это достигается прежде всего в результате надежной идентификации (путем оценки уровня эрозионного среза геохимических аномалий) перспективных на слепое и слабо эродированное оруденение геохимических аномалий, а также благодаря обоснованному исключению из сферы последующих детальных поисково-оценочных работ многочисленных, порою весьма привлекательных по геологоструктурному положению гипергенных аномалий, представленных зонами рассеянной рудной минерализации.

Большое практическое значение рассматриваемой методики интерпретации гипергенных аномалий обусловлено еще одним весьма важным аспектом геохимических поисков, а именно, проблемой переинтерпретации с помощью этой методики результатов выполненных в прежние годы в значительных объемах металлометрического (литохимического по гипергенным ореолам) опробования. Методическим обоснованием постановки работ по своеобразной ревизии результатов выполненных ранее литохимических поисков рудных месторождений по их вторичным ореолам рассеяния является отмеченное выше резкое увеличение глубинности поисков оруденения по вторичным ореолам, обусловленное прежде всего успехами последних лет в изучении первичных ореолов и рассмотренной выше реальной возможностью использования при интерпретации гипергенных аномалий (вторичных ореолов) критериев, основанных на особенностях состава и строения первичных ореолов.

До недавнего времени, как известно, при оценке гипергенных литохимических аномалий широко применялся предложенный А. П. Соловьевым [80] метод оценки прогнозных запасов оруденения в коренном залегании по параметрам вторичных остаточных ореолов рассеяния элементов-индикаторов. Прогнозные запасы рассчитываются по формуле $Q = K \cdot H \cdot q$, где Q — прогнозные запасы металла в коренном залегании; K — коэффициент пропорциональности, устанавливаемый в каждом районе путем проведения специальных опытно-методических работ; H — целесообразная по геологическим данным глубина

подсчета; q — продуктивность, выраженная в тоннах металла для слоя мощностью 1 м;

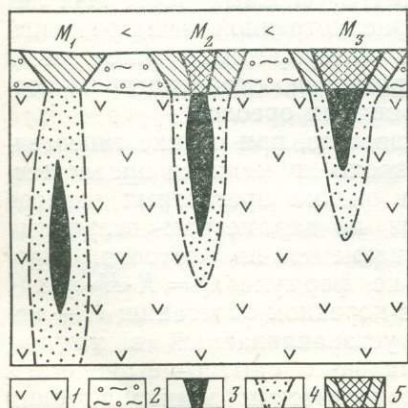
$$q = \frac{P \cdot 2,5 \text{ г/см}^3}{100} = \frac{P}{40} \text{ т/м,}$$

где P — площадная продуктивность M^2 %; $2,5 \text{ г/см}^3$ — усредненный объемный вес горных пород; 100 — коэффициент для перехода от весовых % к тоннам металла. Очевидно, что оценка прогнозных запасов оруденения может быть надежной только в том случае, если имеются данные о глубине эрозионного среза исследуемых участков. Для иллюстрации этого положения обратимся к рис. 44, где показаны три варианта эрозионного среза рудных тел: а) слепое рудное тело, эрозионным срезом вскрыт только первичный ореол; б) слабозеродированное рудное тело; в) рудное тело, уничтоженное эрозией больше чем наполовину. Продуктивности вторичных ореолов для этих трех рудных тел будут равны $M_1 > M_2 > M_3$. Очевидно, что аномалии, связанные со вторым и третьим рудными телами, обладают большей продуктивностью и без учета их эрозионного среза могут быть признаны более перспективными. Поэтому метод оценки прогнозных запасов по продуктивности гипергенных аномалий следует использовать для оценки аномалий примерно одинакового уровня эрозионного среза, что достаточно надежно устанавливается на основе вертикальной зональности первичных геохимических ореолов или же вводит соответствующие поправки, учитывающие уровень эрозионного среза.

Изложенное показывает, что в результате выполненной

Рис. 44. Разные уровни эрозионного среза коренного оруденения

1 — рудовмещающие породы; 2 — элювиальные образования; 3 — рудные тела; 4 — первичные ореолы; 5 — вторичные ореолы



в прошлые годы оценки прогнозных запасов многие аномалии, фиксирующие слепые и слабозеродированные рудные тела и месторождения, могли бы быть отнесены в разряд малоперспективных по причине относительно малой их продуктивности. Именно установление таких случаев, т. е. выявление перспективных на слепое и слабозеродированное оруденение гипергенных аномалий представляет собой главную задачу предлагаемой ревизии результатов металлотрических съемок прежних лет. Большое народнохозяйственное значение этих работ станет очевидным, если учесть огромный объем выполненных металлотрических съемок, а также

исключительную дешевизну рекомендуемых работ, которые по существу сводятся только к повторной обработке уже имеющихся результатов анализа геохимических проб. Изложенное выше показывает важность и безусловную практическую целесообразность совместного изучения первичных и вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов с целью рациональной методики поисков рудных месторождений по их литохимическим ореолам. При этом как в теоретическом, так и в практическом отношении особенно важно дальнейшее изучение подвижности элементов-индикаторов в гипергенных процессах в различных ландшафтно-геохимических условиях. Основными задачами здесь, без сомнения, являются:

А. Увеличение числа элементов в рядах их подвижности в гипергенных условиях с целью обеспечения возможности выбора для мультипликативных коэффициентов большего числа надежных элементов-индикаторов. Это позволит за счет резкого повышения контрастности осевой зональности первичных ореолов добиться удовлетворительной степени соответствия первичных и вторичных ореолов в более сложных случаях. Естественно, что успешное решение этой задачи потребует также увеличения числа элементов-индикаторов рудных месторождений, что возможно только по результатам изучения первичных ореолов, т. е. речь идет об исследовании в процессе научно-методических работ особенностей состава и строения первичных ореолов не только химических элементов широко известных и поэтому уже ставших традиционными индикаторами тех или иных типов рудных месторождений, но широкого круга химических элементов, ранее по разным причинам не исследованных.

Б. Расширение географии сопряженного изучения первичных и вторичных литохимических ореолов различных по составу и условиям формирования месторождений прежде всего с целью уточнения приведенных выше рядов гипергенной подвижности элементов-индикаторов и создания рядов типоморфных для определенных ландшафтно-геохимических условий (аналогично типоморфных для месторождений определенных рудных формаций рядов гипергенной подвижности (рядов зональности) элементов-индикаторов).

Таким образом, подводя итог изложенному выше о корреляции первичных и сопряженных с ними в пространстве вторичных ореолов, следует отметить, что в условиях площадей, где коренные рудовмещающие породы перекрыты элювие-делювиальными отложениями ограниченной мощности, выявление и оценка уровня эрозионного среза первичных геохимических ореолов, а также разбраковка зон рассеянной рудной минерализации возможны по результатам изучения гипергенного поля рассеяния элементов-индикаторов соответствующих месторождений, т. е. можно выделить с помощью зональности первичных ореолов гипергенные геохимические аномалии, перспективные на слепое и слабоэродированное оруденение. Это существенно повышает

эффективность поисков рудных месторождений по их гипергенным ореолам в первую очередь благодаря увеличению, как уже отмечалось, глубинности поисков, поскольку оценка уровня эрозионного среза аномалий представляет собой основу оценки их перспектив на глубину.

Отметим еще раз, что вывод об адекватности первичных и вторичных ореолов справедлив только для остаточных открытых ореолов рассеяния. В районах с устойчивым покровом аллохтонных или делювиальных отложений значительной мощности использование при интерпретации гипергенных аномалий критериев первичных ореолов может не дать положительных результатов, поскольку формирование вторичных ореолов в толще рыхлых образований происходит иным путем, в основном за счет миграции металлосодержащих вод и осаждения элементов из растворов на различных физико-химических барьерах. В подобных случаях по результатам опробования почв с поверхности в лучшем случае может быть решена только задача локализации аномалий, дальнейшая интерпретация которых, возможно, потребует вскрытия коренных пород или же горизонта перекрывающих рыхлых отложений, удовлетворительно коррелирующегося с первичными ореолами в коренных рудоносных породах.

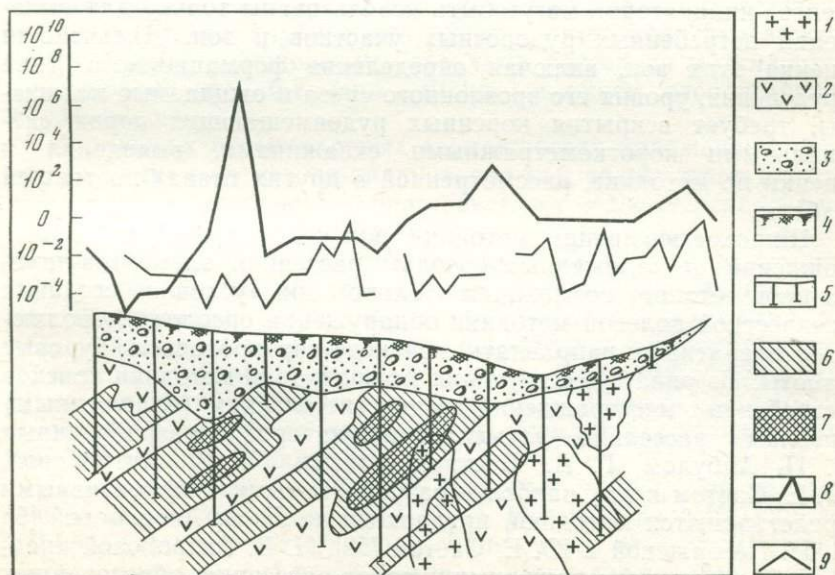
В качестве примера участка, где первичные ореолы перекрыты рыхлыми отложениями значительной мощности, рассматриваются особенности формирования вторичных ореолов рассеяния элементов в толще древнечетвертичных и современных грубосортированных аллювиально-пролювиальных отложений на участке «Юбилейный», расположенном на северо-западном фланге Чорух-Дайронского рудного поля в краевой части Мир-зарабадской депрессии, в зоне ее сочленения с предгорными массивами хребта Могол-Тау. Описываемый участок приурочен к выположенной долине сезонного водотока. Почвенный покров представлен типичными сероземами с характерными корочками из легкорастворимых сульфатов и хлоридов, возникающих за счет испарительной концентрации на поверхности почвы в жаркий период года на участках с неглубоким залеганием (3—5 м) грунтовых вод. Последние отличаются повышенной минерализацией (1—3 г/л) и в процессе своей эволюции меняют свой состав от гидрокарбонатно-кальциевого до хлоридно-сульфатного. В пределах этой площади выполнено поисково-картировочное бурение по сети 100×200 м с забуркой скважин в коренные породы на 5—30 м. В результате геохимического опробования керна скважин в коренных породах выявлены расширяющиеся к западу первичные ореолы ряда элементов-индикаторов вольфрамового оруденения. Геохимическое опробование рыхлых отложений и почв на поверхности по линиям профилей поисковых скважин отчетливых моноэлементных ореолов не выявило. В связи с этим для усиления возможных слабых геохимических аномалий были построены общие мульт-

типликативные ореолы четырнадцати ($W \cdot Be \cdot Sn \cdot Mo \cdot Sr \cdot Co \cdot Ni \cdot Bi \cdot Ba \cdot Ag \cdot Pb \cdot Cu \cdot Zn \cdot Mn$) элементов-индикаторов данного типа оруденения. Мультипликативные ореолы построены по результатам опробования солевой корочки, возникающей в жаркий период на поверхности почвы, а также гумусового горизонта почв и керн буровых скважин.

На рис. 45 показаны результаты опробования коренных пород и почвенного покрова по одному из разрезов буровых скважин. Как видно, над мультипликативными первичными ореолами в коренных породах фиксируются четкие мультипликативные вторичные ореолы, причем в варианте «солевой корочки» (верхний график) они более контрастно отражают контуры аномалий в коренных породах. Глубина верхней границы коренных рудовмещающих пород 5—15 м. Не исключено, что в благоприятных условиях (при отсутствии экранирующих горизонтов или же контрастных геохимических барьеров) первичные ореолы могут быть обнаружены вторичными ореолами и при большей мощности чехла рыхлых пород. Наложенные ореолы рассеяния элементов образуются в результате диффузионно-фильтрационной миграции газов и вод, осуществляющих геохимическую связь

Рис. 45. Особенности первичных и вторичных мультипликативных ореолов в разрезе

1 — гранодиориты; 2 — альбитизированные породы; 3 — рыхлые аллохтонные отложения; 4 — почвы; 5 — буровые скважины; 6, 7 — мультипликативные ореолы в коренных породах (7 — поля повышенных значений); 8, 9 — графики мультипликативных содержаний в солевой корочке (8) и почвах (9)



между вмещающими коренными породами, рудными телами и их первичными ореолами, перекрывающими коренные породы рыхлыми отложениями и современным ландшафтом. Теоретические аспекты миграции элементов при образовании наложенных ореолов рассеяния изучены недостаточно. До недавнего времени возможность образования наложенных ореолов рассеяния элементов при сколько-нибудь значительной мощности аллохтонных отложений (более 10 м) представлялась маловероятной.

Наряду с описанным выше на примере участка «Юбилейный» способом валового опробования почв на поверхности с последующим построением суммарных (мультипликативных или аддитивных) аномалий существует ряд методик выявления наложенных ореолов рассеяния элементов-индикаторов с помощью рационального анализа, которые принципиально отличаются только схемами рационального химического анализа проб. Эти методики позволяют извлекать те или иные фазы, определяемые в свою очередь формами нахождения элементов-индикаторов в наложенных (эпигенетических) ореолах. Обобщение результатов исследований эпигенетических ореолов более тридцати погребенных месторождений меди, молибдена, никеля, свинца и цинка, выполненных Н. И. Несвижской и Ю. Е. Саетом [52], показало, что во всех случаях с применением той или иной методики рационального химического анализа обнаруживаются наложенные ореолы и, следовательно, они являются закономерным и широко распространенным геохимическим признаком погребенных месторождений.

Опыт показывает, что наложенные ореолы рассеяния элементов-индикаторов могут быть использованы только для выявления погребенных рудоносных участков и зон. Дальнейшая оценка этих зон, включая определение формационного типа оруденения, уровня его эрозийного среза и ожидаемые масштабы, требует вскрытия коренных рудовмещающих пород специальными короткометражными скважинами, выявления и оценки по методике, рассмотренной в других главах настоящей работы.

Широкое внедрение методики поисков погребенных месторождений по наложенным ореолам рассеяния элементов-индикаторов станет возможным только при условии создания экспрессной полевой методики обнаружения ореолов, позволяющей оперативно направлять поисково-картировочные буровые работы. Из ряда существующих модификаций методики поисков погребенных месторождений по эпигенетическим (наложенным) ореолам рассеяния элементов-индикаторов, разработанных С. П. Албулом, Г. А. Вострокнутовым, Л. В. Антроповой, Ю. Е. Саетом и др., наиболее разработанными и эффективными представляются методики, предложенные Л. В. Антроповой [5], Н. И. Несвижской и Ю. Е. Саетом [52]. Л. В. Антроповой предложена методика наложенных ореолов рассеяния, образованных

металлоорганическими соединениями ряда металлов, являющихся характерными индикаторами рудных месторождений. Сущность предложенной Л. В. Антроповой экспресс-методики определения содержаний металлоорганических форм элементов в пробах, отобранных из гумусового горизонта почв, заключается в следующем: из навески проб при воздействии 0,1 М раствора пиррофосфата натрия одновременно выделяются гуматы и фульваты металлов, которые затем разрушаются мокрым способом и полученный раствор анализируется на интересные элементы. Для исключения искусственного завышения или занижения содержания элементов, обусловленного непостоянством содержания органического вещества в пробах, в методику анализа проб включено определение в пиррофосфатной вытяжке углерода. Этот элемент является одной из основных строительных единиц гуминовых и фульвокислот (~50% от состава других компонентов) и определяется сравнительно просто. Концентрации элементов-индикаторов выражаются по отношению к углероду в процентах. Это избавляет от влияния неполного выделения гуматов и фульватов в разных пробах, а также от необходимости взятия строго определенной навески пробы.

На рис. 46 приведен разрез через залежь свинцово-цинкового месторождения Джайрем, перекрытую толщей глини мощностью 30—60 м, которые в верхней части сменяются слоем закрепленных гумусированных песков. На поверхности месторождения развиты перемещающиеся эоловые пески мощностью 2—4 см. Следует отметить, что по исследованному разрезу рудная залежь непосредственно не выходит под толщу рыхлых отложений. Между ними находятся известково-кремнистые сланцы мощностью 5 м и более. Как следует из рис. 46, находящееся на значительной глубине оруденение отчетливо фиксируется контрастными наложенными ореолами рассеяния металлоорганических соединений свинца и цинка в верхнем слое гумусированных песков.

О больших потенциальных возможностях наложенных ореолов рассеяния элементов-индикаторов как индикаторов скрытого на глубине оруденения свидетельствует факт фиксации с помощью наложенных ореолов не только погребенных, но и слепо-погребенных месторождений, когда рыхлыми отложениями перекрыты слепые месторождения. В качестве примера на рис. 47 приведен разрез через Орловское полиметаллическое месторождение. Как видно, слепо-погребенное оруденение, залегающее на глубине почти 600 м (при мощности перекрывающих рудомещающих коренные породы рыхлых отложений до 100 м) отчетливо фиксируется аномалиями металлоорганических соединений свинца, цинка и меди.

Для выявления наложенных (эпигенетических) ореолов рассеяния элементов-индикаторов Н. И. Несвижская и Ю. Е. Саэт [52] предлагают методику определения суммы элементов-индикаторов в ацетатно-буферной вытяжке. Ниже приводится пропись

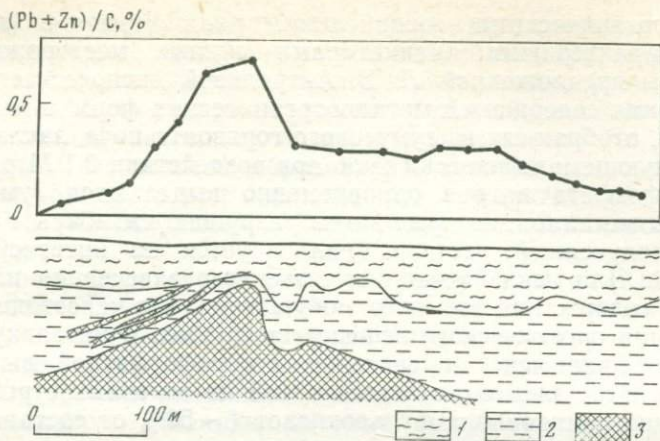


Рис. 46

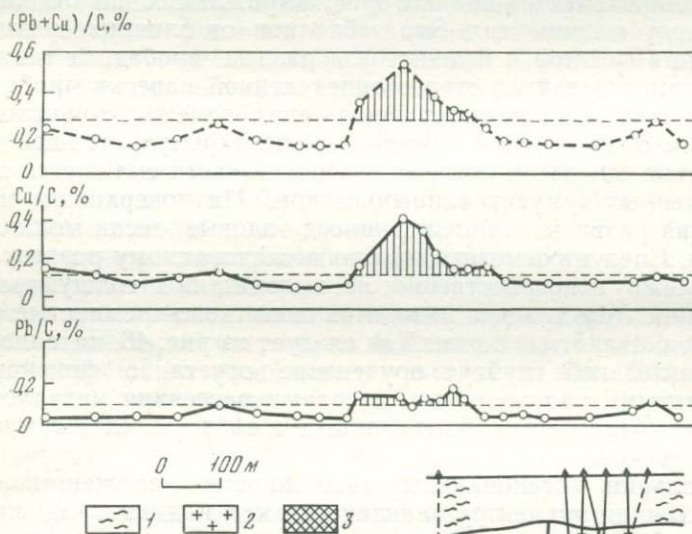


Рис. 47

Рис. 46. График распределения суммы металлов на поверхности месторождения Жайрем (по Л. В. Антроповой)

- 1 — глины с горизонтов гумусированных песков;
 2 — осадочные породы;
 3 — рудное тело

Рис. 47. Распределение свинца и меди в почвах над полиметаллическим оруденением. Орловское месторождение. Рудный Алтай (по Л. В. Антроповой)

- 1 — рыхлые отложения;
 2 — альбит-порфиры;
 3 — рудные тела

ацетатно-буферной вытяжки (Несвижская, [52]). Навеску воздушно-сухой пробы весом 5 г, либо остаток пробы, при отдельном определении форм нахождения микроэлементов (после извлечения воднорастворимых соединений и обменно-сорбированной формы) заливают буферной уксуснокислой смесью в соотношении 1 : 10 твердой и жидкой фаз. Буферную смесь составляют из 2 объемов 1 н. уксусной кислоты и 1 объема 1 н. раствора уксуснокислого натрия. Обработка пробы смесью происходит в течение 20 мин. на кипящей водяной бане, при условии погружения колбы в кипящую воду. Количество обработок лимитируется полным выходом карбонатов. Проверка полноты извлечения карбонатов вытяжкой следующая: часть (0,5 г) уже обработанной пробы переносят в 200-миллилитровую колбу, приливается 30—40 мл дистиллированной воды и перемешивается в течение 30 с. Затем в колбу добавляют несколько капель фенолфталеина и около 1—2 г кристаллического фтористого натрия. Суспензию взбалтывают и нагревают до кипения. После 5 минутного кипения суспензию охлаждают до 20° С и добавляют еще несколько капель фенолфталеина. Если окраска суспензии розовая, это означает, что в пробе есть карбонаты; если фенолфталеин не дает окрашивания, то, значит, карбонаты из пробы извлечены и обработка буфером на этом заканчивается.

Эта качественная проверка на выход карбонатов основана на фиксации иона CO_3^{2-} в результате реакции неразложившихся карбонатов с фтористым натрием. Исследования на количество повторностей карбонатной вытяжки проводят перед началом работ из отдельной навески для 2—3 проб со сходными литолого-геохимическими особенностями. Часто бывает достаточно одной повторности. После обработки пробы на водяной бане проводят фильтрование в сухие колбы, либо в полиэтиленовые бутылочки емкостью не менее 100 мл. Остаток на фильтре высушивают и при необходимости направляют на следующую фазовую обработку (перекисную вытяжку). В фильтрате проводят определение микроэлементов.

Методика определения суммы меди, цинка и свинца следующая [52]. Аликвоту вытяжки 10 мл вносят в делительную воронку на 100 мл, добавляя 0,5 мл 30% раствора сегнетовой соли (для связывания железа) и вносят около 15 мл 0,2 М раствора перекристаллизованной буры до изменения цвета желтого раствора на красный (по индикатору — феноловый красный). Затем добавляют 2 мл 0,004% раствора дитизона в четыреххлористом углероде и жидкость в воронке взбалтывают в течение 30 с. Окраска раствора дитизона в зависимости от содержания тяжелых металлов изменяется от зеленоватой до малиново-красной. Экстракт вместе с небольшим количеством вытяжки сливают в колориметрическую пробирку и сравнивают со стандартной шкалой, приготовленной в тех же условиях. Шкала состоит из серии эталонов с содержанием сумм металлов в эталонах

0—1—2—4—6 мкг. В качестве стандартного используют раствор, содержащий 1 мкг цинка, меди и свинца в соотношении 3 : 1 : 1. Шкала устойчива в течение нескольких часов. Если окраска экстракта будет соответствовать самому яркому эталону шкалы, повторяют экстракцию с меньшей аликвотой до тех пор, пока окраска экстракта не будет соответствовать окраске в пределах шкалы. Малые аликвоты разводят буферным раствором до объема 10 мл. Содержание суммы металлов в пробе рассчитывают по формуле:

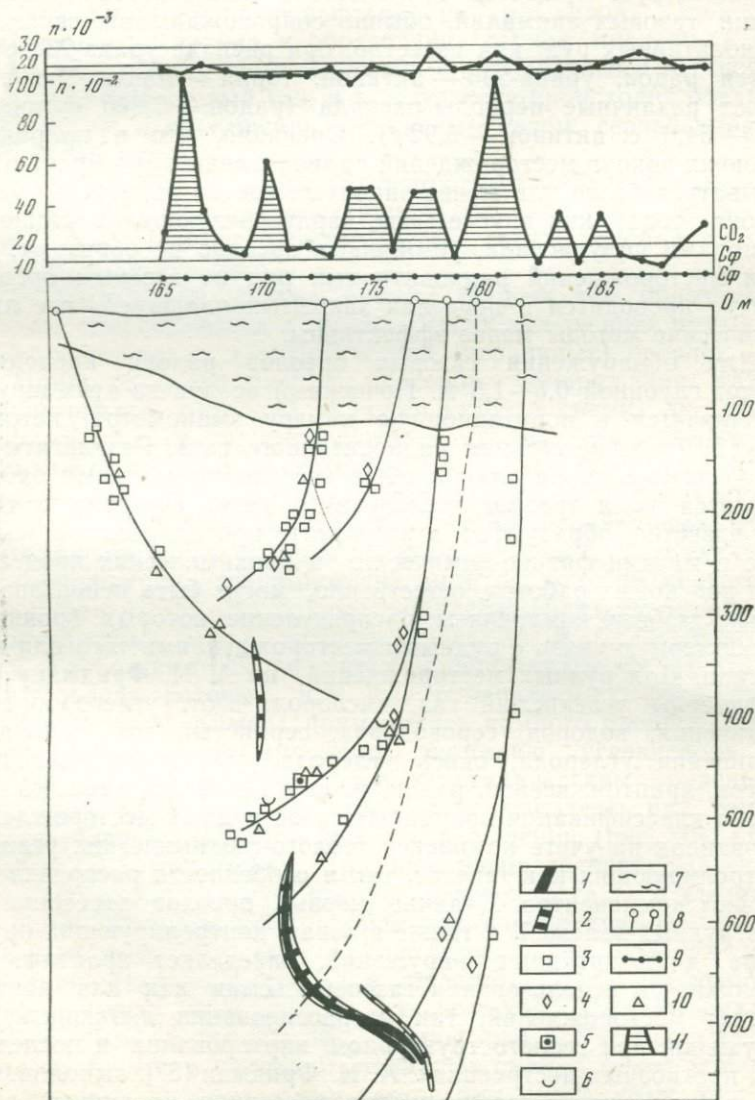
$\Sigma \text{ металлов} = x \cdot a \cdot 100\% / b \cdot P$, где x — значение стандартной шкалы; b — аликвота вытяжки; a — общий объем вытяжки из пробы, в мл; P — навеска пробы, в мкг. Как показывают исследования, наложенными ореолами рассеяния суммы свинца, цинка и меди также фиксируются рудные залежи, перекрытые рыхлыми отложениями значительной мощности. На рис. 48 в качестве иллюстрации значительной глубинности наложенных ореолов рассеяния суммы перечисленных выше элементов-индикаторов изображен разрез через Иртышское полиметаллическое месторождение (Рудный Алтай). Как следует из рис. 48, слепопогребенное оруденение, залегающее на глубине 600 м (при мощности рыхлых отложений более 100 м), фиксируется контрастными наложенными ореолами рассеяния суммы металлов, выявленными в результате анализа ацетатной вытяжки из проб, отобранных на поверхности. Отметим, что эта залежь по данным работы [5] фиксируется также ореолами рассеяния металлоорганических соединений тех же элементов-индикаторов. Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что наложенные (эпигенетические) ореолы рассеяния химических элементов являются эффективными индикаторами погребенного и слепопогребенного оруденения и этот метод должен найти подобающее себе место в рациональном комплексе поисковых методов, в частности, геохимических.

ГАЗОВЫЕ ОРЕОЛЫ

В природных условиях миграция химических элементов часто происходит в газовой фазе и роль этой формы переноса химических элементов при образовании рудных месторождений, по видимому, существенна. Установлено, что миграция элементов в газовой фазе происходит не только в период формирования месторождений, но и после, в частности, в процессе их разрушения, что в ряде случаев приводит к формированию газовых ореолов рудных месторождений, которые могут быть использованы в качестве поисковых признаков. Следует отметить, что в настоящее время газовые методы нашли достаточно широкое применение при поисках нефтяных и газовых месторождений, тогда как при поисках рудных месторождений эти методы по существу находятся в стадии экспериментальной разработки и все еще не получили широкого распространения, быть может,

Рис. 48. Распределение суммы тяжелых металлов в почвах над полиметаллическим оруденением Иртышское месторождение, Рудный Алтай (по Ю. Е. Саегу)

1 — массивные руды; 2 — вкрапленные руды; 3 — пирит; 4 — халькопирит; 5 — галенит; 6 — хлоритизация; 7 — глины и суглинки неоген-четвертичного возраста; 8 — буровые скважины; 9 — точки литохимического опробования; 10 — рудовмещающие вулканогенно-осадочные породы; 11 — аномалия



за исключением газовых методов поисков радиоактивных руд. Однако исследования последних лет показывают, что некоторые модификации газовых методов имеют значительные потенциальные возможности; можно ожидать, что в ближайшем будущем они займут достойное место в общем комплексе геологоразведочных работ на рудные месторождения.

При поисках рудных месторождений первым из газовых методов начал применяться метод так называемой эманационной съемки, используемой при поисках месторождений радиоактивных руд. Сущность этого метода заключается в обнаружении газовых аномалий, обычно сопровождающих скопления радиоактивных руд: как известно, при распаде урана-238 образуется радон, урана-235 — актинон, тория — торон. Эти газы имеют различные периоды распада (радон — 3,825 суток, торон — 54,6 с, актинон — 3,92 с). Очевидно, что в природных условиях вокруг месторождений радиоактивных руд будут образовываться более или менее значительные по размерам ореолы радона, тогда как другие газы, характеризующиеся меньшими периодами полураспада, устойчивых ореолов не образуют. Поиски месторождений радиоактивных руд по газовым ореолам обычно проводятся в пределах закрытых площадей, где литохимические методы менее эффективны.

Для обнаружения газовых ореолов радона проводятся шпуровые глубины 0,5—1,5 м. Почвенный воздух из этих шпуров откачивается в ионизационную камеру эманометра, которым измеряется концентрация радиоактивного газа. Результаты замеров выносятся на план и общеизвестными методами оконтуриваются поля ореолов исследуемого газа. Природные газы, как известно, образуются в результате протекающих в земной коре и мантии физико-химических и биохимических процессов. При поисковых работах, естественно, могут быть использованы только газовые компоненты, распределение которых проявляет закономерную связь с рудными месторождениями того или иного типа. Для рудных месторождений, по А. И. Фридману [87], характерны углекислый газ, кислород, азот, углеводородные соединения, водород, сероводород, сернистый газ, галоидные соединения углерода, окись углерода, аммиак, редкие газы (аргон, криптон, ксенон, радон, неон и гелий). В табл. 13 приведена классификация природных газов рудных месторождений, основанная на учете комплекса геолого-геохимических условий, контролирующих как генезис, так и особенности распределения газовых компонентов. Наличие газовых ореолов рассеяния вокруг рудных залежей, а также в зонах, контролирующих оруденение дизъюнктивных нарушений, определяет практическую возможность использования газовой съемки как для поисков рудных месторождений, так и трассирования дизъюнктивных нарушений при геологоструктурном картировании и последующих прогнозных построениях. А. И. Фридман [87], выподнивший детальное изучение связи ореолов рассеяния различных газов

с месторождениями твердых полезных ископаемых, выделяет следующие четыре основных вида связи газовых компонентов с рудными телами:

1. Скопления газов в рудных телах, локализованных в тектонически ослабленных зонах, являющихся основными путями перемещения как рудообразующих растворов, так и природных газов.

2. Скопления ряда газовых компонентов в результате протекающих в зоне окисления рудных месторождений химических реакций. В зоне окисления сульфидных руд, в частности, происходит образование сульфатов из сульфидов. Происходит связывание кислорода и образование серной кислоты и сульфатов. Последние, взаимодействуя с карбонатными растворами, выделяют углекислый газ, и в результате происходит обеднение кислородом и обогащение углекислым газом, сероводородом и сернистым газом.

3. Появление в аномальных концентрациях газовых компонентов продуктов радиоактивного распада. К числу этих компонентов относятся радон, торон, гелий, водород, тяжелые углеводородные газы.

4. Эндогенные газовые ореолы рудных тел, образованные газами, заключенными в газово-жидких включениях рудных тел и окружающих их литохимических (первичных) ореолов.

Наиболее эффективным способом обнаружения газовых геохимических аномалий является газовая съемка по почвенному воздуху, сущность которой заключается в определении концентрации газовых компонентов в почвенном воздухе перекрывающих рудные тела рыхлых отложений. В становлении методов поисков месторождений по ореолам различных газовых компонентов большую роль сыграли работы В. А. Соколова — основоположника геохимических методов поисков месторождений нефти и газа. На рудных месторождениях газовая съемка в пятидесятых годах впервые проведена В. С. Глебовской и С. С. Глебовским [23], не считая радиоактивные месторождения, при поисках которых, как уже отмечалось, газовая съемка (эманационная съемка) применялась намного раньше. Рис. 49 иллюстрирует геохимическую аномалию углекислого газа в почвенном воздухе над полиметаллическим оруденением. Геохимические аномалии этого газа выявлены над ртутным оруденением на Сахалинском месторождении (рис. 50). Приведенные на этом рисунке графики распределения углекислого газа выявляют высокую воспроизводимость газовой съемки.

А. И. Фридман [87] рекомендует следующую по существу общепринятую методику газовой съемки при поисках месторождений твердых полезных ископаемых. Пробы из почвенного воздуха отбираются из скважин малого диаметра (43—65 мм) и небольшой глубины (не более 3 м). Опытом газовой съемки в пределах различных рудных полей установлено, что удовлетворительные результаты могут быть получены

Таблица 13. Классификация природных газов рудных месторождений (по А. И. Фридману)

Тип газа	Тектоническая приуроченность месторождений	Время окончания магматической деятельности	Основные источники природных газов	Приуроченность и локализация основных количеств природных газов
Углекислый, иногда углекисловодородный	Молодые и подвижные зоны геосинклиналей и платформ	Главным образом Р — Q	Расположенные поблизости и на сравнительно небольшой глубине магматические очаги	Раздробленные и трещиноватые зоны, связанные с разрывными нарушениями
Углекисло-углеводородный	Краевые подвижные зоны геосинклиналей (переходные зоны)	Проявление молодой магматической деятельности неизвестно. Гидротермальная деятельность проявлялась в К, Р и N	Глубоко расположенные магматические очаги, возможно, находящиеся на последнем этапе своей деятельности. Осадочные породы, содержащие углестое и битуминозное вещество	Трещиноватые и раздробленные породы вблизи разрывных нарушений; пористые проницаемые разности осадочных пород
Углеводородный	Плиты	Не моложе К	Угольные пласты, нефтегазоносные породы, породы с органическим веществом, подвергшиеся термальному воздействию со стороны интрузивных тел	Трещиноватые и раздробленные зоны метаморфизованных и гидротермально-измененных пород, агломераты ультраосновных пород в трубках взрыва. Угольные пласты и пористые разности вмещающих осадочных пород
Углеводородно-азотный, реже углеводородный. Крайне редко — азотноводородный	Кристаллические щиты	В основном S—D	Метаморфические и изверженные породы; незначительная миграция из глубин	Поры, локальные трещиноватые зоны в изверженных и метаморфических породах

* т. у. — тяжелые углеводородные газы (гомологи метана — от C_2H_6 и выше).

при глубине скважин 1,3—1,5 м. Отбор проб подпочвенного воздуха осуществляется с помощью специального пробоотборника, герметизирующего забойную часть скважины и позволяющего исключить возможность попадания в пробу атмосферного воздуха. Анализ проб производится на месте пробоотбора

Характер газо-выделений	Газовые компоненты			Происхождение природных газов	Месторождение
	основные	иногда встречаются в значительных количествах	встречающиеся в виде примесей		
Газирующие минеральные источники; длительное газирование разведочных скважин. Крупные и мелкие сульфидные выделения в горных выработках	CO ₂ , H ₂	N ₂	CH ₄ , H ₂ S, т. у., редкие газы	Магматическое (ювенильное), химическое, биохимическое, радиогенное (в очень незначительном количестве)	Район Тырны-Аузского вольфрамо-молибденового месторождения, Худесское медно-колчеданное (Северный Кавказ). Валежские золоторудные (Восточная Забайкалье) и др.
То же	CO ₂ , CH ₄ , N ₂	H ₂	H ₂ S, т. у., редкие газы	Магматическое (ювенильное), биохимическое, химическое и радиогенное (в ничтожном количестве)	Ртутные Северо-Западного Кавказа, Карпат, США и др.
Длительное газирование скважин. Крупные и мелкие сульфидные выделения в горных выработках	CH ₄ , N ₂ , H ₂	CO ₂ , т. у.*, He	H ₂ S, редкие газы	Биохимическое и химическое, магматическое, радиогенное (в незначительном количестве)	Норильские медно-никелевые, алмазосные Якутии и Южной Африки, золото-урановые Южной Африки, железорудные Клявленд, ртутные Донбасса и др.
Слабое, эпизодическое газирование. Интенсивное газирование отмечается крайне редко. Главным образом мелкие сульфидные выделения в горных выработках. Крупные очень редки	CH ₄ , N ₂ , H ₂	CO ₂ , He	т. у., H ₂ S, редкие газы; редко — NH ₃	Магматическое (ювенильное), радиогенное (иногда в значительном количестве)	Хибинские апатито-нефелиновые, железорудные Даннемора (Швеция), золоторудные Кальгурли (Австралия) и др.

с помощью шахтных оптических интерферометров различных типов.

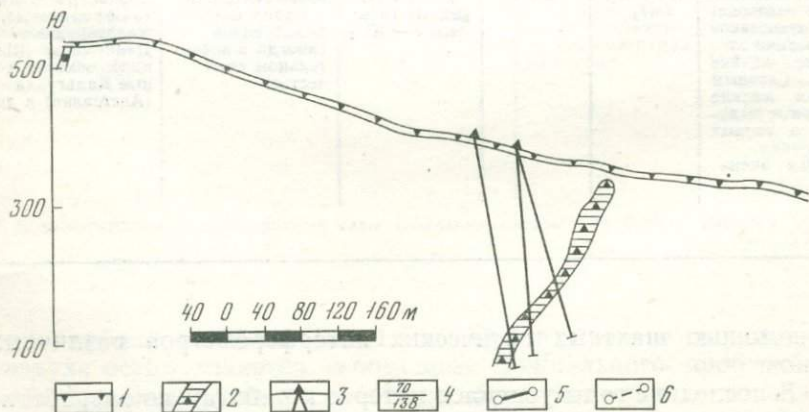
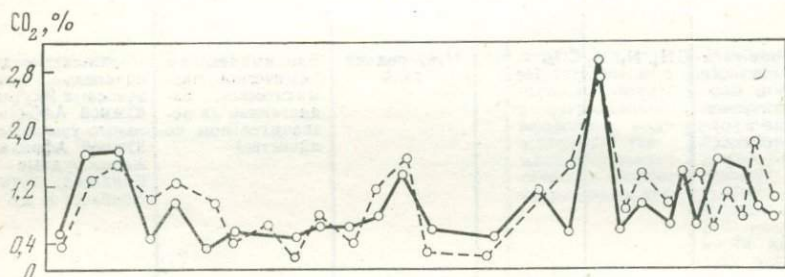
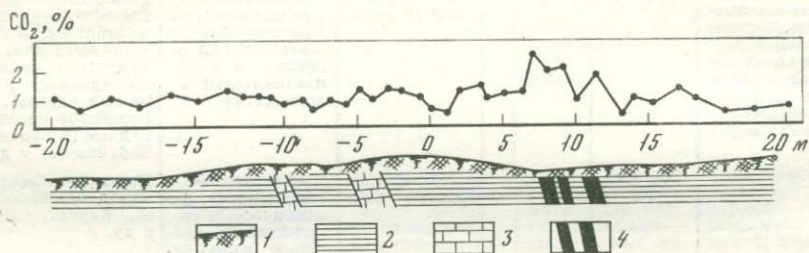
В последние годы усилился интерес к работам по разработке и внедрению в практику геологоразведочных работ газо-ртутного метода поисков рудных месторождений. Теоретические

Рис. 49. Содержание углекислого газа в подпочвенном воздухе на месторождении полиметаллов в Забайкалье (по В. С. Глебовской и С. С. Глебовскому)

1 — рыхлые отложения; 2 — сланцы; 3 — известняки; 4 — рудные тела

Рис. 50. Содержание углекислого газа в подпочвенном воздухе Сахалинского ртутного месторождения на Северном Кавказе (по А. И. Фридману)

1 — рыхлые отложения; 2 — ртутное оруденение; 3 — буровые скважины; 4 — точки отбора пробы и ее номер; 5 — содержание углекислоты 6—7 сентября 1965 г.; 6 — содержание углекислоты 8—9 июля 1966 г.



основы этого метода разработаны А. А. Сауковым, Н. А. Озеровой, В. П. Федорчуком, В. З. Фурсовым и другими исследователями. Этот метод основан на высокой летучести паров ртути, способных проникать через значительные толщи перекрывающих отложений. Отбор проб почвенного воздуха для определения концентраций паров ртути также производится из неглубоких скважин и бурок с помощью специальных герметических устройств, соединенных с приемником атомно-абсорбционного фотометра или же с камерой поглотителя с сорбентом. В дальнейшем производится определение концентраций ртути либо колориметрически, либо на атомно-абсорбционном фотометре. Для выявления газовых ореолов ртути находит все более широкое применение атомно-абсорбционный фотометр, обладающий высокой чувствительностью определения паров ртути [88], а также экспрессностью анализа.

На рис. 51 приведены графики распределения ртути в подпочвенном воздухе на ртутном месторождении Пламенное (Чукотка). Как видно, месторождение фиксируется высококонтрастной аномалией ртути в газовой (подпочвенный воздух) фазе, тесно коррелирующей с литохимическими ореолами рассеяния ртути (твердая фаза). Рис. 51 показывает, что аномалии ртути в газовой фазе более контрастны (по сравнению с результатами опробования рыхлых отложений).

Исследованиями последних лет установлено, что в принципе газовые ореолы рассеяния ртути могут быть полезными также при поисках не только собственно ртутных, но и других по составу месторождений (полиметаллических и других), где ртуть, являясь элементом-спутником, также формирует газовые ореолы рассеяния [88]. Отчетливые газовые ореолы рассеяния ртути, в частности, установлены на одном из золоторудных месторождений Южного Урала (рис. 52). Для методики газортутных поисков рудных месторождений принципиально важно то, что отчетливые газовые ореолы рассеяния ртути фиксируются над погребенным и слепо-погребенным оруденением. На рис. 53 приведены графики распределения ртути над рудными телами ртутного месторождения Улу-Тоо (Киргизия), перекрытыми аллохтонными лессовидными суглинками мощностью 10—25 м. Несмотря на аллохтонный характер перекрывающих рыхлых отложений, ртутное оруденение по результатам ртутнометрических определений выделяется отчетливыми аномалиями. На рис. 54 приведены результаты газортутных исследований, выполненных на медно-полиметаллическом месторождении Старе Ранско в ЧССР. На этом месторождении слепо-погребенное оруденение залегает на глубине 100—140 м. Мощность перекрывающих коренные рудовмещающие породы рыхлых отложений достигает 20 м. Несмотря на столь неблагоприятные для образования на поверхности связанных с оруденением геохимических аномалий, слепо-погребенное оруденение, тем не менее, фиксируется отчетливыми газовыми ореолами рассеяния

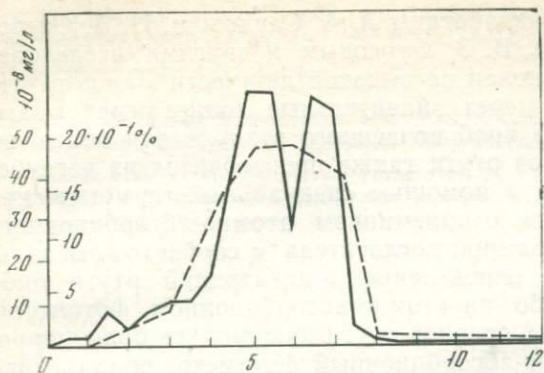


Рис. 51. Графики концентрации ртути в газовой и твердой фазе на поверхности месторождения Пламенное (по В. З. Фурсову)

- 1 — элювио-делювиальные образования;
- 2 — липариты;
- 3 — зона дробления;
- 4 — рудное тело;
- 5 — дизъюнктивные нарушения;
- 6 — точки измерения;
- 7 — график концентрации ртути в газовой фазе;
- 8 — график концентрации ртути в твердой фазе

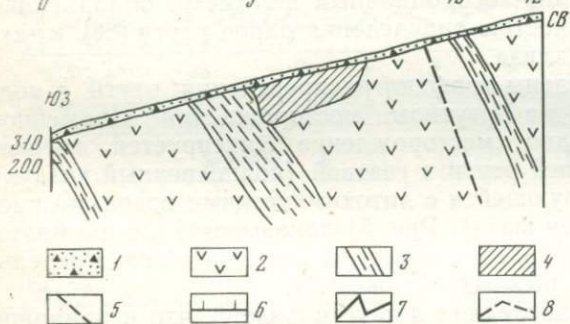


Рис. 52. График концентрации ртути в почвенном воздухе (по Г. П. Шорохову)

- 1 — глинисто-щебнистая кора выветривания;
- 2 — рудовмещающие альбитофиры и их туфы;
- 3 — кварц-серцитовые сланцы;
- 4 — рудные тела;
- 5 — буровые скважины;
- 6 — график концентрации ртути в почвенном воздухе

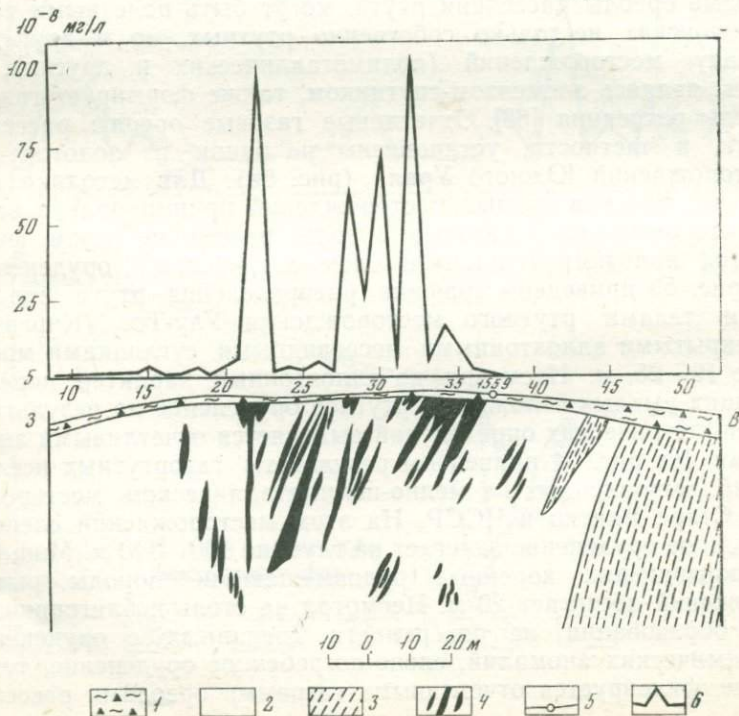


Рис. 53. Графики концентрации ртути в газовой и твердой фазе на ртутном месторождении Улу-Тоо (по В. З. Фурсову)

- 1 — аллохтонные суглинки;
- 2 — сланцы;
- 3 — основные эффузивы;
- 4 — листовиты;
- 5 — рудные тела;
- 6 — разрывные нарушения;
- 7 — график концентрации ртути в газовой фазе;
- 8 — график концентрации ртути в твердой фазе

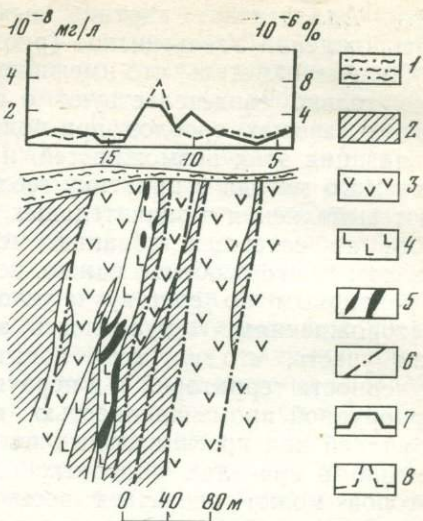
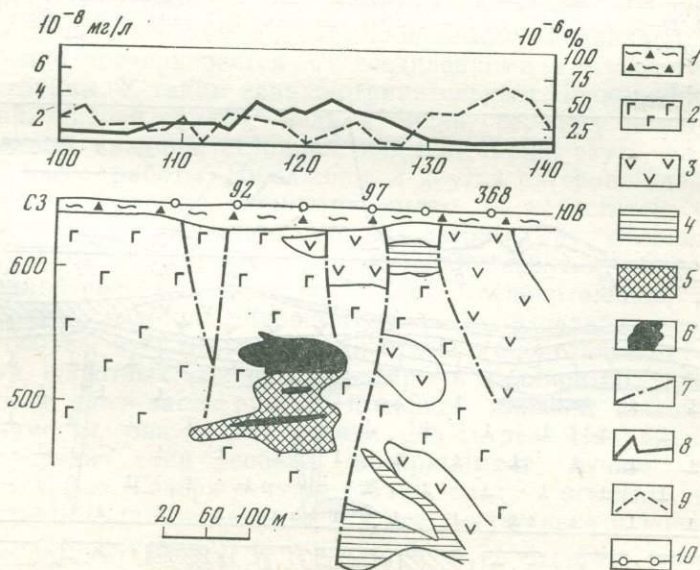


Рис. 54. Графики концентрации ртути в газовой и твердой фазе на месторождении Старе Ранско (по В. З. Фурсову)

- 1 — кора выветривания;
- 2 — габбро;
- 3 — ультрабазиты;
- 4 — кварциты;
- 5 — вкрапленные руды;
- 6 — массивные руды;
- 7 — разрывные нарушения;
- 8 — график концентрации ртути в газовой фазе;
- 9 — график концентрации ртути в твердой фазе;
- 10 — точки опробования



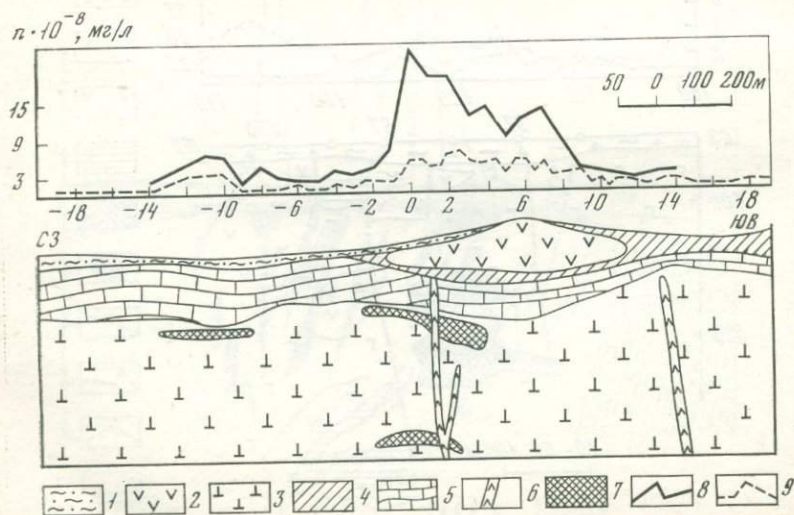
ртути. Аналогичная картина выявлена на слепо-погребенном месторождении Узельгинское (рис. 55).

Следует отметить, что имеющиеся в настоящее время данные пока только свидетельствуют о потенциальных возможностях метода газовых ореолов при поисках рудных месторождений. Реализация этих возможностей и широкое внедрение рассматриваемого метода в практику геологоразведочных работ потребуют выполнения в значительных объемах научно-методических работ по совершенствованию методики поисков по газовым ореолам и, что особенно важно, по ее апробации применительно к различным по составу и условиям формирования рудным месторождениям. Актуальность этих работ станет очевидной, если учесть, что по мере повышения степени геологической изученности территорий, и в первую очередь в районах освоенных горнорудной промышленностью, возрастает значение закрытых площадей как потенциальных источников минерального сырья. Именно в пределах подобных площадей применение газовых методов может оказаться весьма эффективным: могут быть выявлены наиболее перспективные на погребенное оруденение участки, заслуживающие постановки более детальных работ.

В заключение рассмотрения методических вопросов использования газовых ореолов при поисках рудных месторождений кратко рассмотрим так называемый кинологический метод,

Рис. 55. Графики концентрации ртути в почвенном воздухе на месторождении Узельгинское (по В. З. Фурсову)

1 — суглинки и глины; 2 — андезитовые порфириды; 3 — липариты; 4 — кремнистые сланцы; 5 — известняки; 6 — дайки габбро-диабазов; 7 — рудные тела; 8 — график измерений 22—29 июня 1973 г.; 9 — график измерений 2—3 июля 1973 г. после интенсивных дождей



основанный на использовании собак при поисках рудных скоплений. Этот метод по своему существу относится к газовым, ибо использует способность собак с помощью обоняния обнаруживать газовые аномалии. В последние годы обоняние собаки стало использоваться в технике и появились собаки, работающие по обнаружению утечки газа в газопроводах, работающие по розыску обломков самолетов после аварий, по отысканию мин и зарядов ВВ и т. д. При всех этих работах собака используется как запаховый биологический прибор с голосовым индикатором (лай). По вопросу о запахе химических веществ даже только неорганического происхождения имеется довольно обширная литература. Интересна попытка итальянского ученого Никколини [103] рассмотреть с точки зрения наличия или отсутствия запаха все элементы Периодической системы Д. И. Менделеева. Рассмотрев с указанной точки зрения таблицу элементов Д. И. Менделеева, Никколини приходит к выводу, что если провести черту из левого верхнего ее угла в правый нижний, то в образовавшейся правой половине окажутся элементы, названные им запахо-положительные, а в левой — запахо-отрицательные. Действительно, в правой половине находятся элементы, обладающие специфическим запахом: галлоиды, фосфор, сера, мышьяк. Кроме того, здесь находятся элементы, сами не обладающие запахом, но приобретающие его в соединении с другими, также не пахнущими. Это водород, бор, углерод, азот, кислород, кремний, титан, марганец, селен, цирконий, рутений, олово, сурьма, теллур и осмий, а также такие элементы, как галлий и германий, которые приобретают запах только при соединении с пахнущими элементами. Элементы левой половины таблицы, как правило, не принимают участия в соединениях, обладающих запахом и даже, по-видимому, подавляют его. Это особенно подчеркивается их соединениями с элементами первой группы. К таким запахо-отрицательным Никколини относит литий, натрий, калий, медь, рубидий, серебро, цезий, олово, бериллий, кальций, стронций, кадмий, барий, ртуть, радий.

Однако работы Никколини и других авторов, касающиеся запахов химических элементов, имеют тот недостаток, что критерием их наличия или отсутствия авторы берут обоняние человека, существа, стоящего в отношении развития этого чувства на самой низкой ступени среди всех млекопитающих, т. е. являющегося крайним микросматиком. Исследования показывают, что собака чует не только животные (биологические) запахи (пота, животных аминокислот и др.) в миллион раз лучше, чем человек, но и запах руд, не имеющий никакой биологической значимости, она чует в тысячи раз острее. Например, запах поваренной соли собака воспринимает лучше человека в 11 000 раз. Говоря о чутье собаки, следует отметить, что обонятельный эпителий занимает у нее значительно большее пространство, чем у других животных, а на каждый квадратный миллиметр этой области у нее приходится во много раз больше

обонятельных элементов — обонятельных клеток (для сравнения: 340 000 — у собаки и 10 000 у человека). При этом на каждой обонятельной клетке у собаки сидят 5—6 булавовидных придатков (булав), вооруженных большим количеством ультрамикроскопических волосков, вместо имеющихся 1—2 булав с 2—3 волосками у человека.

Опытные работы показали, что изученный спектр запахов собаки определяют почти безошибочно. Так, в процессе проведения подготовительного этапа дрессировки собак доказана принципиальная возможность их обучения для поиска сульфидных рудных валунов (Карелия), разбросанных по поверхности или зарытых под слоем земли и дерна, а также валунов в естественных условиях. Установлено, что собаки находят как валуны руд, так и валуны горных пород с бедной вкрапленностью сульфидов (опыт с 7 собаками). Установлена возможность использования собак для поиска сульфидных рудных тел, залегающих как на сухих возвышенных участках, так и под болотом (опыт с 5 собаками). Исследованиями, выполненными группой сотрудников ИМГРЭ под руководством В. А. Васильева на Терлиг-Хайском ртутном месторождении, установлено, что собаки достаточно надежно обнаруживают точки минерализации. Примером работы на маршрутах может служить километровый профиль, где собака Джильда «обследовала» 48 пикетов (точек наблюдения), из которых в заинтересовавших ее сорока пикетах была обнаружена видимая киноварь. В тех случаях, когда видимой киновари в отмеченных собакой пикетах не отмечалось, брали и пробы, наличие ртути в которых в дальнейшем было подтверждено анализом (рис. 56).

Определенный интерес представляет сопоставление результатов работы собак и анализа в естественном залегании с применением атомного абсорбционного ртутного газоанализатора по единым профилям. Как следует из рис. 57, корреляция хорошая: максимумы аномалий по измерениям прибора подтверждены реакцией собак. Выполненные опытно-методические исследования по выяснению возможности и эффективности использования собак при поисках рудных месторождений выявили принципиальную возможность применения собак для поисков рудных месторождений ртути. Наряду с этим установлен ряд факторов, влияющих на «заинтересованность» работы собак и осложняющих их использование: климатические условия, проходимость в маршруте породы (частые порезы ног о скальные выступы), внешние раздражители (мошка и др.), посторонние животные и др. Но главное обстоятельство, препятствующее использованию собак в производственных масштабах, заключается в недостаточной информативности результатов кинологических поисков: с помощью этого метода только фиксируется аномалия обычно одного элемента, отсутствуют сведения о морфологии и внутреннем строении аномалий, о типоморфном комплексе элементов-индикаторов, т. е. сведения,

чрезвычайно важные для интерпретации геохимических аномалий. Обнаружение аномалий — задача, которую можно решить с помощью кинологического метода, более успешно решается другими конкурирующими геохимическими методами, поэтому вряд ли есть серьезные основания рассчитывать на определенные перспективы в развитии этого метода.

Рис. 56. График изменения по профилю содержания ртути в твердой фазе. Треугольники обозначают точки активной реакции собаки

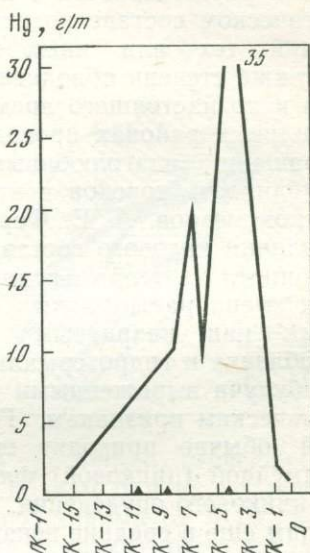
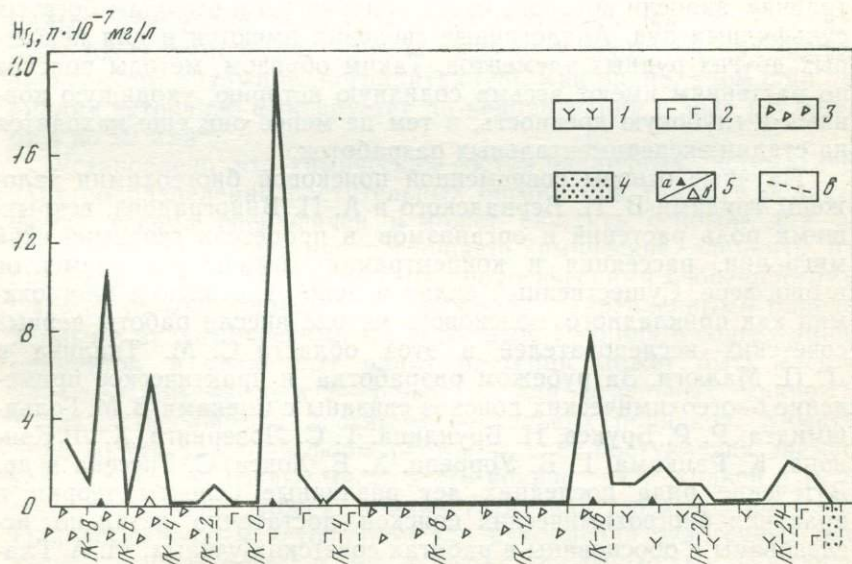


Рис. 57. График изменения по профилю содержания ртути в газовой фазе

- 1 — порфириты;
- 2 — габбро-диабазы;
- 3 — брекчии;
- 4 — песчаники;
- 5 — точки активной реакции собаки:
- а — с видимой минерализацией,
- б — без видимой минерализации;
- 6 — геологические границы



БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ

Основой биогеохимического метода поисков рудных месторождений является установленная многочисленными исследованиями тесная геохимическая связь между биосферой и литосферой. С давних пор известно, что некоторые растения или общий облик растительности в целом могут свидетельствовать о литологическом составе подстилающих пород, наличия в них скоплений тех или иных химических соединений (элементов), а также степени обводненности нижележащих толщ. С древности и до настоящего времени поиски воды в пустынных и засушливых районах проводят в местах, где отмечается распространение влаголюбивых растительных сообществ, причем глубинность поисков в этом случае достигает нескольких десятков метров. А. Е. Ферсман еще в 1909 г. отмечал резкие различия видового состава растений над змеевиками и прорывающими их телами гранитоидов на острове Эльба. Характерная смена растительных ассоциаций часто фиксируется геологами над кварцевыми и кальцитовыми жилами, зонами дробления и гидротермально-измененных пород и т. п., которые, не будучи выраженными в рельефе, легко трассируются по ботаническим признакам. Говоря о поисках рудных месторождений, обычно приводят ставшие уже классическими примеры галмейной (цинковой) флоры — характерного спутника свинцово-цинкового оруденения, известного чешским и немецким рудокопам еще в средние века. На Урале и на Алтае опытным рудознатцам был хорошо известен качим Патрэна — «медная травка», заросли которого часто приурочены к выходам богатых сульфидных руд. Аналогичные сведения имеются и для некоторых других рудных элементов. Таким образом, методы поисков по растениям имеют весьма солидную историю, уходящую корнями в глубокую древность, и тем не менее они еще находятся на стадии экспериментальных разработок.

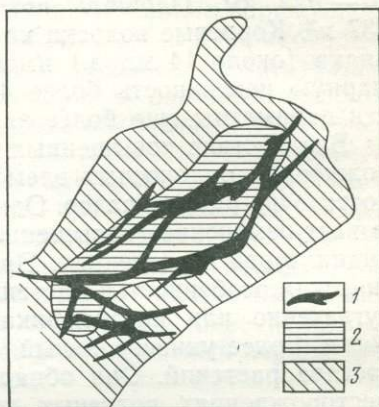
Научные основы современной поисковой биогеохимии заложены трудами В. И. Вернадского и А. П. Виноградова, вскрывшими роль растений и организмов в процессах геохимической миграции, рассеяния и концентрации химических элементов в биосфере. Существенный вклад в дело становления биогеохимии как прикладного, поискового метода внесли работы первых советских исследователей в этой области С. М. Ткалича и Д. П. Малюги. За рубежом разработка и практическое применение биогеохимических поисков связаны с именами В. М. Гольдшмидта, Р. Р. Брукса, Н. Брундина, Т. С. Ловеринга, Х. Л. Кэннона, К. Ранкама, Г. В. Уоррена, Х. Е. Хокса, С. Тиссена и др. В течение ряда последних лет различные аспекты теории и практики биогеохимических поисков достаточно детально исследованы и обоснованы в работах советских ученых: М. А. Глазовской, И. И. Гинзбурга, Л. И. Грабовской, С. В. Викторова, П. В. Ивашова, А. Л. Ковалевского, В. Ф. Мицкевича, Н. Г. Нес-

ветайловой, А. А. Саукова, А. И. Перельмана, В. В. Поликарпочкина и многих других.

Как известно, в составе растительных организмов присутствуют практически все элементы Периодической таблицы. При этом пай 9 особенно характерных элементов (О, С, Н, N, Са, Р, S, К, Mg) составляют 99,76% от общего веса живого вещества: в их числе 3 наиболее распространенных элемента (О, С, Н) — 98,5%. На долю остальных 83 элементов приходится всего лишь 0,24%. Элементы, относящиеся к первой группе, принято называть макроэлементами. Элементы второй группы, содержащиеся в растениях в количестве меньше 0,01%, относят к микроэлементам. Большинство элементов,

Рис. 58. Биогеохимические ореолы бериллия на поверхности редкометалльного месторождения (по Л. И. Грабовской)

1 — рудные тела;
2, 3 — биогеохимические ореолы бериллия
(3 — поля повышенных содержаний элемента-индикатора)



используемых в качестве индикаторов при биогеохимических поисках, относится к микроэлементам, причем при их исследованиях приходится оперировать содержаниями от $n \cdot 10^{-2}\%$ до $n \cdot 10^{-12}$ (например, Ra). Последнее стало возможным благодаря разработке массовых аналитических методов определения столь малых содержаний элементов в золе растений. На рис. 58 показаны биогеохимические ореолы рассеяния бериллия над бериллиеносными рудами в апогранитах [28]. Как видно, аномалия бериллия устойчиво фиксируется по концентрации в золе растений от 4 до 20 млн⁻¹.

Установлено, что химический состав различных систематических подразделений растительных организмов (даже в области фона) весьма специфичен и может служить основой для их классификации. Растения поглощают химические элементы избирательно, в соответствии с их биологическими особенностями, выработанными длительной эволюцией, закрепленными определенными биохимическими механизмами. Разница в содержаниях элементов в различных видах растений может быть весьма значительной, часто в 2—3 раза, а для отдельных макро- и микроэлементов она достигает нескольких порядков. Химический состав растений формируется за счет поступления элементов из внешней среды. Часть этого количества в жидкой и газообразной фазе может усваиваться надземными органами. Однако основным источником для накопления рудогенных элементов служат почвы и материнские породы (руды). Поступление рудного вещества в организм растений осуществляется

либо в виде водных растворов, либо за счет активного контакта корней с рудными минералами, с последующим выщелачиванием и усвоением элементов непосредственно из твердой фазы. Общий объем поверхности активного контакта корневой системы с вмещающей породой может быть весьма значителен. Так, по М. А. Глазковской [15], длина корней первого порядка озимой ржи — 0,07 км; второго — 5,4 км; третьего — 175 км; четвертого — 422 км. Площадь поверхности всех корней достигает 237 м². Корневые волоски на корнях третьего и четвертого порядка (около 14 млрд.) имеют длину около 10 000 км и суммарную поверхность более 400 м². Для многолетних растений эти параметры еще более значительны.

Воздействие повышенных концентраций (на участках месторождений) рудоносных элементов на растительные организмы достаточно разнообразно. Однако в конечном результате оно вызывает изменение (повышение) содержания рудных элементов-индикаторов в растениях. Происходит также изменение биологических особенностей растений и вследствие этого — изменение (угнетение или интенсификация) процессов их жизнедеятельности. Более универсальный признак — изменения химического состава растений. Они обнаруживаются практически на всех месторождениях полезных ископаемых и могут быть даже при незначительном повышении концентраций элементов-индикаторов в подстилающей породе (рассеянная минерализация, породные аномалии и т. д.). Поэтому ведущим направлением в биогеохимических поисках является изучение состава растительных организмов. Учет биологических особенностей растительных сообществ более трудоемок, меньше поддается количественным измерениям и в практике поисков (в виде так называемого геоботанического метода) имеет подсобное значение.

Собственно биогеохимический метод поисков в современном понимании представляет собой площадное изучение аномальных (т. е. повышенных по сравнению с местным фоном) концентраций элементов-индикаторов оруденения в растениях. Основной методический прием биогеохимических поисков — планомерное опробование (по сетке или профилям) растительного покрова территории, где предполагается нахождение рудных концентраций элементов. Выбор местоположения и направления линий опробования производится по тому же принципу, как при обычных литогеохимических поисках: профили опробования ориентированы вкрест простирания предполагаемых рудо локализирующих структур, при этом предполагается выход профилей за контуры аномального участка в область местного фона. При биогеохимическом опробовании обычно в пробу отбираются надземные, желательны многолетние органы (стебли, ветви, кора) растений одного вида древесной кустарниковой или травяной растительности, достаточно широко распространенного в пределах исследуемой площади.

Предварительными методическими исследованиями или же с привлечением литературных материалов устанавливается пригодность данного вида растений как объекта опробования при поисках рудной минерализации. Последнее позволяет исключить из сферы опробования виды растений или растительные ассоциации, для которых не характерна концентрация искомых рудных элементов-индикаторов. С целью выявления наиболее контрастных биогеохимических аномалий, экспериментально определяют органы растений, наиболее благоприятные для опробования. В табл. 14 приведена сводка данных о характере концентраций различных элементов-индикаторов в органах растений. Необходимо также учитывать, что концентрации элементов в различных органах растений могут значительно варьировать в зависимости от возраста, стадии вегетации, экспозиции кроны дерева и погодных условий. Имеются данные о том, что интенсивные дожди могут вымывать из листьев более половины содержащихся в них цинка, меди, редких щелочных элементов (лития, рубидия, цезия). Ясно, что методика и время отбора биогеохимических проб должны выбираться с учетом всех выше перечисленных факторов. Установлено, что наиболее благоприятный период для проведения биогеохимических поисков — вторая половина лета,

Таблица 14. Распределение элементов-индикаторов по органам растений (по В. В. Поликарпочкину)

Элемент	Характер распределения
Цинк	Наибольшие содержания в листьях. В корнях и коре содержания больше, чем в древесине ствола. В ветвях содержания, промежуточные между содержаниями в древесине и листьях.
Свинец	Накапливается в корнях в наибольших количествах. В древесине ствола, ветвях и листьях содержания близкие
Медь	Наибольшие содержания в корнях. В древесине ствола, ветвях и листьях содержания одинаковые. Также концентрируется в стеблях и сухих плодах травостоя
Серебро	Наибольшее содержание в корнях
Олово	То же
Селен	» »
Молибден	В листьях содержание больше, чем в коре и древесине. Энергично концентрируется в клубеньках (на корнях) и семенах бобовых
Никель	Накапливается в древесине. Концентрируется в листьях и стеблях травостоя
Кобальт	Свойственно равномерное распределение в наземной части растений. В корнях не накапливается
Бор	В листьях содержание в десятки раз больше, чем в стеблях, ветвях, семенах
Марганец	Концентрируется в листьях и корнях
Кадмий	В ветвях содержание больше, чем в листьях

а также осенне-зимний период, когда контрастность биогеохимических ореолов большинства элементов-индикаторов максимальна. Объем биогеохимических проб определяется с учетом зольности различных растений, исходя из факта, что для проведения необходимого комплекса аналитических исследований навеска золы должна быть не менее 5—20 г.

При выборе комплекса элементов-индикаторов того или иного типа оруденения учитывается, что интенсивность накопления химических элементов (а следовательно, и интенсивность их биогеохимических ореолов) различна даже для одного и того же благоприятного вида или органа растений [63] по соотношениям концентраций элементов в зональных остатках растений и подстилающих породах установлены ряды биологического поглощения различных химических элементов (табл. 15). Естественно, что данные этой таблицы характеризуют средний химический состав золы растительных организмов. В реальной ситуации величина этих коэффициентов может колебаться в значительных пределах. Однако для одних и тех же условий предпочтительнее ожидать более контрастных биогеохимических ореолов цинка, бора, стронция, молибдена по сравнению с ореолами таких элементов, как титан, хром, вольфрам.

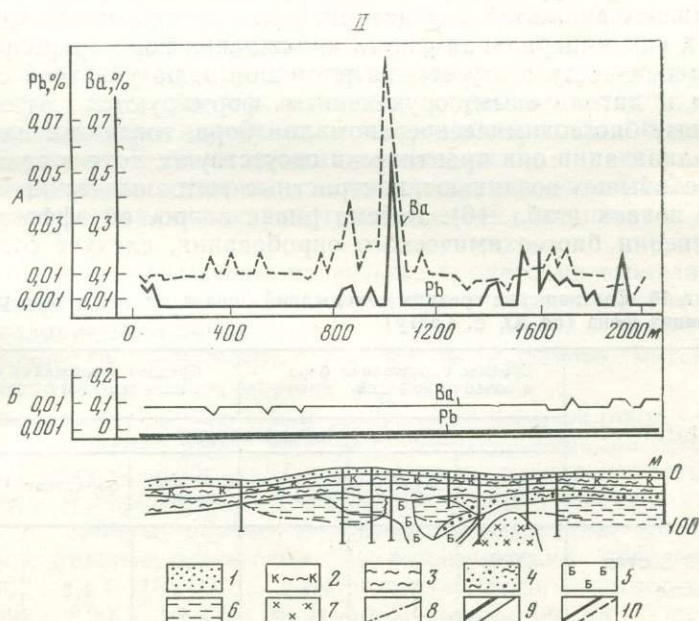
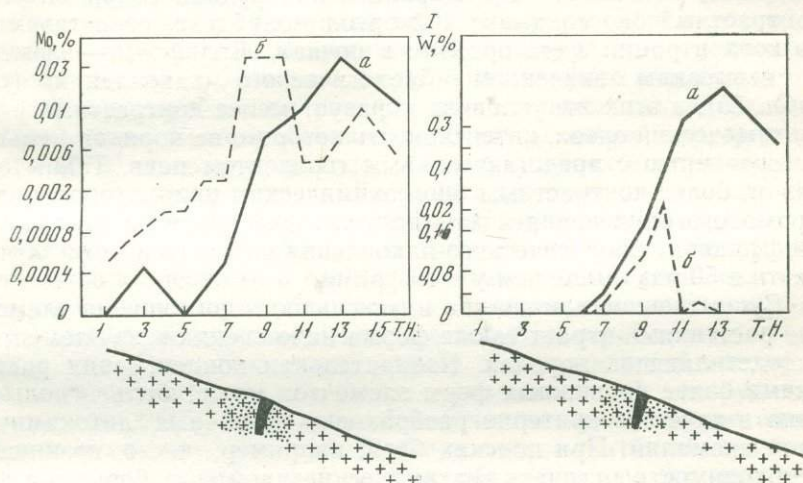
На рис. 59 показаны графики распределения концентраций вольфрама и молибдена в иллювиальном горизонте бурых горнолесных почв и ветвях клена мелколистного на одном из вольфрамовых объектов Дальнего Востока. Кварц-шеелитовые, с небольшой примесью молибдена, жилы в гранодиоритах закрыты элювиально-делювиальными образованиями 1,5—2,0 м мощностью. Во

Таблица 15. Ряды биологического поглощения элементов (по А. И. Перельману)

Группа элементов	Интенсивность накопления или захвата	Коэффициенты биологического поглощения				
		100·n	10·n	n	0, n	0,0n—0,00n
Элементы биологического накопления	Энергичное	P, S, Cl, Br, J				
	Сильное	Ca, Na, K, Mg, Sr, Zn, B, Ge				
Элементы биологического захвата	Среднее	Mn, F, Ba, Ni, Cu, Ga, Co, Pb, Sn, As, Mo, Hg, Ag, Ra				
	Слабое и очень слабое	Si, Al, Fe, Ti, Zr, Rb, Y, Cr, Li, Y, Nb, Th, Se, Be, Cs, Ta, U, W, Sb, Cd				

Рис. 59. Распределение вольфрама и молибдена (I) (а — в почвах и б — растениях над кварц-шеелитовой жилой) и распределение свинца и бария (II) в почвах (А) и растениях (Б) на участке Дальний Запад (по В. О. Гетманчуку и др.)

1 — золотые пески; 2 — карбонатизированные глины павлодарской свиты; 3 — глины аральской свиты; 4 — глины английской свиты; 5 — метасоматические тела барита с полиметаллическими рудами; 6 — кремнистые баритизированные породы; 7 — углисто-кремнисто-карбонатные породы; 8 — граница коры выветривания; 9 — результаты опробования почв; 10 — результаты опробования растений



всех горизонтах бурых горно-лесных почв над рудной зоной установлены отчетливые и высококонтрастные ореолы вольфрама и молибдена, с превышением концентраций вольфрама над молибденом примерно в 10 раз (как и в рудах). Растительность этого участка представлена широколиственным лесом с преобладанием клена мелколистного, дуба монгольского, липы маньчжурской и густого подлеска из лещины и других кустарников. Опробование растительности, совмещенное с точками опробования почв, позволило зафиксировать над рудной зоной высококонтрастный биогеохимический ореол молибдена, сопоставимый по концентрации с его ореолом в почвах. Вольфрам — элемент с невысоким значением биологического накопления (см. табл. 15), в этих же условиях образует менее контрастный биогеохимический ореол, интенсивность которого на порядок меньше по сравнению с представительным горизонтом почв. Таким образом, более контрастным биогеохимическим индикатором вольфрамового оруденения в данных условиях является молибден, коэффициент биологического накопления которого в этом случае почти в 50 раз выше, чем у вольфрама.

Существенное влияние на интенсивность поглощения элементов растениями играет также форма нахождения этих элементов в подстилающих породах. Избирательная концентрация растениями более подвижных форм элементов может быть использована в качестве критерия разбраковки вторичных литохимических аномалий. При поисках бора, например, часто возникает необходимость отличать геохимические аномалии бора, связанные с зонами турмалинизации (непромышленный тип), от перспективных аномалий над датолитовыми и боратовыми рудами.

Так как минеральная форма нахождения бора предопределяет интенсивность его усвоения растениями, на участках с боратовым и датолитовым оруденением формируются высококонтрастные биогеохимические аномалии бора, тогда как на зонах турмалинизации они практически отсутствуют, хотя в последнем случае обычно возникают контрастные литохимические аномалии в почвах (табл. 16). Рассматривая вопрос об эффективном применении биогеохимического опробования, следует отметить,

Таблица 16. Соотношение средних содержаний бора в почвах и золе растений в единицах фона (по Ю. Е. Саеу)

Район	Среднее содержание бора в почвах аномалий			Среднее содержание бора в золе растений		
	минерализация					
	датолитовая	боратовая	турмалиновая	датолитовая	боратовая	турмалиновая
Дальний Восток	20,0	2,0	8,0	8,0	13,0	1,0
Забайкалье	—	1,4	7,0	—	4,2	1,3

что этим методом может быть обнаружена преобладающая часть типов месторождений полезных ископаемых, которые выявляются и другими массовыми геохимическими методами и, в частности, наиболее широко применяемыми, литохимическими.

Однако применение биогеохимического опробования оправдано лишь для определенных ландшафтно-геологических условий. В большинстве других случаев биогеохимический метод неконкурентноспособен по сравнению с широко используемыми на практике литохимическими поисками по первичным и вторичным ореолам элементов-индикаторов. В первую очередь это обусловлено трудностями геологической интерпретации биогеохимических аномалий, а также затруднениями чисто методического порядка при проведении поисков на значительных площадях, когда невозможно опробование однотипных видов или органов растений. Для получения сопоставимых данных в этом случае приходится дублировать пробы в каждой точке и по другим, распространенным в пределах площади опробования видам растений. Существенно также, что биогеохимические ореолы по сравнению с ореолами в горных породах, рыхлых образованиях и водах являются ореолами второго удаления, связанными с рудными концентрациями не непосредственно, а через другие механизмы рассеяния. Последнее, наряду с биологической спецификой поглощения (как это было показано выше), затрудняет или вообще делает невозможной количественную интерпретацию биогеохимических аномалий. В общем случае считается, что биогеохимическое опробование нецелесообразно проводить там, где рудные концентрации в подстилающих породах могут быть выявлены в результате обычного поверхностного опробования почв, рыхлых образований и коренных пород.

Более эффективным (несмотря на все сложности интерпретации результатов) биогеохимическое опробование становится там, где выявление первичных и вторичных ореолов с поверхности затруднено. К таким площадям относятся:

а) территории с покровом аллохтонных отложений (ледниковых, эоловых, аллювиальных) повышенной мощности — более 3—5 м;

б) районы с интенсивно развитыми процессами выщелачивания химических элементов из почв (сюда относятся многие районы с подзолистыми почвами);

в) площади распространения крупноглыбового материала (коллювиальные осыпи, морены и т. п.);

г) переувлажненные территории болот и торфяников.

При проведении работ на перечисленных площадях сеть биогеохимического опробования определяется, исходя из масштаба поисков и распространения отдельных видов растений, являющихся в данном случае объектом опробования. Наиболее распространенные масштабы биогеохимических поисков это 1:50 000 и 1:10 000 с сетью пробоотбора соответственно 100×50 и 100×10 (25) м. Вряд ли целесообразно более де-

тальное биогеохимическое опробование, рекомендуемое отдельными исследователями [47] «для замены части дорогостоящих горных выработок и мелких скважин, используемых для выявления и прослеживания рудных тел». Нельзя забывать, что для оценки даже самых перспективных биогеохимических ореолов все равно понадобится проходка тех же самых горных выработок и скважин для установления факта наличия рудной залежи и определения ее кондиций. Видимо, не следует выводить биогеохимическое опробование за рамки чисто поискового метода, оперируя понятием экономической эффективности данного вида работ по сравнению с другими, возможно, более трудоемкими и дорогостоящими видами опробования, применяемыми для оценки содержания металлов в руде, предполагаемых масштабов рудных залежей и характера эрозионного среза оруденения. Определение этих параметров по результатам биогеохимического опробования пока еще неосуществимо.

В качестве примера, иллюстрирующего возможности биогеохимического метода, можно привести результаты биогеохимического опробования в условиях Центрального Казахстана, что свидетельствует об эффективности данного метода при поисках оруденения в засушливых районах с покровом аллохтонных образований мощностью даже около 40 м. Хотя и локальная, но весьма контрастная биогеохимическая аномалия свинца и бария зафиксирована над барит-полиметаллической залежью в углисто-кремнисто-карбонатных отложениях верхнего фанена, перекрытых засоленными и карбонатизированными глинами неоген-палеогенового возраста и эоловыми песками. Проведенное на этой же площади обычное литохимическое опробование оказалось безрезультатным (см. рис. 59). Предполагается, что в данном случае биогеохимическая аномалия зафиксировала погребенный сорбционно-солевой ореол рассеяния, развитый на уровне засоленных глинистых толщ. Ценен в данном случае тот факт, что растения, являясь естественным концентратором рудных элементов, активно накапливают их подвижные формы над рудными телами. Это позволяет фиксировать последние методами массовых спектральных определений, не прибегая к помощи более трудоемких и дорогих аналитических процедур (методы фазового анализа и т. п.). Очевидно, что рациональное комплексирование биогеохимического опробования и современных методов определения слабых наложенных ореолов (в контурах выявленных биогеохимических аномалий) позволит более достоверно опосредовать и те районы, где массовые литохимические поиски не дают положительных результатов.

Другим примером, характеризующим возможность успешной интерпретации даже слабоконтрастных биогеохимических аномалий по аналогии с эталонными аномалиями в пределах известного рудопроявления, являются результаты биогеохимической съемки, проведенной также в Центральном Казахстане Иванчиковым В. П. На участке площадью около 60 км², также закры-

том толщей палеоген-неогеновых песчано-глинистых пород ангийской (до 67 м) и аральской (50 м) свит, четвертичными суглинками и эоловыми песками (10—16 м), проведено биогеохимическое опробование различных видов польни по сети 30×200 м. По результатам анализов выявлены биогеохимические ореолы площадью около 1 км^2 с концентрацией свинца от 0,003 до 0,05%. Вновь выявленные ореолы по интенсивности примерно соответствуют биогеохимическим ореолам эталонного месторождения, а по размерам в несколько раз превышают ореол месторождения ($0,3 \times 0,4$ км). При проверке аномалий по серии поисковых скважин в кремнисто-карбонатных толщах фаменского яруса обнаружена свинцово-цинковая минерализация с содержанием свинца до 0,4%, цинка до 0,8%. В коре выветривания над залежью оконтурены протяженные вторичные ореолы свинца, цинка, а также кадмия, меди и бария, вертикальная мощность которых не превышает 10—20 м (вверх по разрезу).

Глубинность биогеохимического метода поисков, позволяющая фиксировать аномальные концентрации в растениях при мощности рыхлых отложений до нескольких десятков метров, подтверждается и исследованиями в других рудных районах. Так, Н. А. Авессаломовой и Л. И. Грабовской [2] показано, что в гумидных условиях при мощности покрова промытых кварцевых песков, достигающей 20 метров, бериллиевая минерализация в коренных породах отчетливо оконтуривается по аномальным концентрациям бериллия в растениях. В табл. 17 приведены данные [85] о глубинах залегания рудных тел, обнаруженных при биогеохимическом опробовании растительного покрова.

Приведенные выше материалы свидетельствуют, что биогеохимический метод поисков может быть эффективным в широком диапазоне природных условий, причем в отдельных районах это, по сути дела, единственный поисковый метод, позволяющий без значительных затрат дать достоверную оценку возможной рудоносности на закрытых и заболоченных территориях. Значи-

Таблица 17. Глубина залегания рудных тел, фиксируемых биогеохимическими аномалиями

Месторождение	Местонахождение	Глубина от поверхности, м
Никелевое	Макола, Финляндия	4
Молибденовое	Рауцио, Финляндия	7
Хромитовое	Склэри, Нижняя Силезия	15
Железорудное	Октябрьское, Сибирь	20
Медное	Калугинское, Урал	25
Урановое	Ла-Вентана, США	25
Полиметаллическое	Уинтворт, США	30
Медноколчеданное	Урал	33

тельный интерес в этом отношении могут иметь опережающие биогеохимические поиски, проводимые в зимний период на труднодоступных в летнее время заболоченных площадях.

В результате биогеохимических поисков, проведенных в различных районах нашей страны и за рубежом, на территориях, неблагоприятных для опробования другими методами прикладной геохимии, открыт ряд месторождений и рудопроявлений различных металлов, среди которых одно из крупнейших за рубежом месторождений молибдена Эндако (табл. 18). Тем не менее, имея почти 35-летнюю историю методических разработок, биогеохимический метод поисков на практике все еще не применяется в достаточно широких масштабах. Причина этого, на наш взгляд, заключается прежде всего в отсутствии работ по сравнительной оценке применительно к типоморфным по ландшафтно-геохимическим условиям районам возможностей биогеохимического и других геохимических методов с целью установления условий, где биогеохимический метод наиболее эффективен, т. е. вполне конкурентноспособен. В отличие от этого многие исследователи противопоставляют этот метод другим геохимическим методам, пытаясь доказать его универсальность, отдаляя тем самым внедрение биогеохимического метода в общий комплекс поисковых и геохимических методов поисков.

Из других негативных факторов, сдерживающих широкое внедрение данного метода, следует отметить сложность самой методики биогеохимического опробования, т. е. необходимость предварительного определения нужных видов растений для опробования, отбор нескольких проб на одной точке для индикации различных групп элементов, несопоставимость результатов даже на соседних точках в том случае, если невозможно опробовать один и тот же вид растений и т. п. До сих пор не существует

Таблица 18. Примеры месторождений и рудных тел, обнаруженных по результатам биогеохимического опробования [27]

Месторождение	Район	Объект опробования	Элемент-индикатор
Эндако (молибден)	Канада	Хвойные деревья	Mo
Бетлехем (медь, молибден)	Канада	Хвойные деревья	Mo
Шиплинское (медь)	Хакассия	Береза	Fe, Cu
Октябрьское (железо)	Восточная Сибирь	Береза	Fe
Ла-Вентана Меса (уран)	США	Сосна, можжевельник	U
Еллоу Кэт Меса, Питсбург Парк, Литл Ева и др. (уран)	США	Астрагалы, лебеда, сосна, можжевельник	U
Сары-Чеку, восточный фланг (медь, молибден)	Узбекистан	Вишня, миндаль, жимолость, зверобой	Cu, Mo
Ежевичное (полиметаллы)	Казахстан	Польнь, арча, зверобой	Pb, Zn
Фланговое (медь)	Казахстан	Польнь, ковыль	Pb, Cu

четких критериев интерпретации выявленных биогеохимических аномалий. Отсутствуют четко разработанные для каждого рудного района принципы комплексирования биогеохимического, гидрогеохимического и других массовых методов геохимических поисков. Очень часто биогеохимические поиски пытаются рекомендовать для тех районов, где литохимическое опробование уже доказало свою состоятельность, мотивируя тем (только!), что графики концентрации того или иного элемента имеют более высокие значения по сравнению с опробованием почв. При этом совершенно не рассматриваются характер корреляции содержания или соотношений содержаний элементов в биогеохимических и первичных ореолах, именно те параметры, по которым определяется перспективность любой гипергенной (а значит и биогеохимической) аномалии.

Геоботанический метод поисков основан на выявлении визуальных изменений отдельных ореолов или растений целиком под влиянием повышенных концентраций рудных элементов в почвах и подстилающих породах. Обычно геоботанические исследования проводятся в комплексе с биогеохимическим опробованием и носят вспомогательный характер.

По С. М. Ткаличу [85], среди подобных растений-индикаторов наибольшее значение имеют прямые положительные индикаторы. Последние подразделяются: 1 — универсальные; 2 — локальные (местные); 3 — характерные фитоценозы; 4 — тератологические (патологические) и другие изменения растений; 5 — угнетение и отсутствие растительного покрова. Из перечисленных групп наиболее распространенными, а соответственно, и наиболее важными в практическом отношении являются тератологические изменения растений, возникающие вследствие повышенного или недостаточного содержания тех или иных солей и химических элементов в питании растений. Тератологические изменения растений выражаются в увеличении или уменьшении их отдельных органов или всего растения в целом, появлении патологических, уродливых форм, изменении цвета и окраски растений, преждевременном отмирании отдельных органов или всего растения, а также во всех прочих отклонениях от нормального развития этого вида в обычных экологических условиях. На участках с повышенным содержанием некоторых элементов — хрома и бора, например, в растительном покрове появляются пустые прогалины, являющиеся в данном случае индикаторами хромовых руд. Повышенные концентрации металлов в почве могут влиять на окраску цветков: медь вызывает появление синих и голубых оттенков, марганец — красные и розовые тона, никель вызывает обесцвечивание цветка. Повышение содержания бора в подстилающих породах приводит к потемнению окраски листьев, скручиванию их по краям, деформации междоузлий и появлению ползучих опущенных форм растений. Избыток кобальта приводит к появлению белых омертвевших пятен на листьях. Избыток железа задерживает рост верхушки деревьев и ведет к утолщению

корней. Повышенные содержания урана и тория вызывают серьезные изменения всего внешнего облика растений с нарушением пропорций различных органов. Даже из этого неполного перечня совершенно очевидно существование многочисленных геоботанических индикаторов, которые при систематически проводимых геоботанических наблюдениях могут быть дополнительными признаками для обнаружения перспективных в рудопоисковом отношении участков на смежных с эталонными рудными объектами территориях, перекрытых покровом аллохтона различной мощности.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В основе гидрохимического метода поисков рудных месторождений лежит изучение водных ореолов и потоков рассеяния химических элементов, формирующихся в зоне контакта грунтовых и подземных вод с рудными залежами и окаймляющими их первичными и вторичными геохимическими ореолами. Вопросы теории и практики гидрохимического метода поисков разработаны большой группой советских и зарубежных ученых, среди которых следует отметить А. А. Бродского, Е. Е. Белякову, А. И. Германова, Г. А. Голеву, И. И. Долуханову, С. Р. Крайнова, А. М. Овчинникова, А. Н. Токарева, П. А. Удодова, Р. В. Бойла, Х. Е. Хокса, Д. С. Уэбба, Д. Уайта, Р. Аллана, Дж. Тумса, и др. Известно, что природные воды обладают универсальной способностью растворять в тех или иных количествах практически все химические элементы и их соединения, в том числе все природные минералы. Содержание отдельных элементов в природных водах варьирует от десятков процентов (кислород, водород) до миллиардных и менее долей процента (радий, радон и др.). Концентрация элементов в воде зависит от целого ряда причин, одной из которых является содержание указанных элементов во вмещающих горных породах. Важное значение имеет также растворимость различных химических соединений. Пространственное распределение концентраций одного и того же элемента в водах подвержено значительным колебаниям. В природных водах, химический состав которых формируется в околорудном пространстве, содержание рудогенных элементов может в сотни — тысячи раз превышать их значения в области фоновых вод. Подобные гидрохимические аномалии моно- или полиэлементного состава представляют собой водные ореолы рассеяния месторождений. В отличие от водных ореолов существуют и другие (нерудные) гидрохимические аномалии, возникающие под влиянием других факторов, в том числе выщелачивания отдельных соединений агрессивными водами процессов соленакопления, разгрузки глубинных напорных вод в вышележащих горизонтах, искусственного загрязнения подземных вод.

По стабильности проявления гидрохимические аномалии делят на постоянные и временные. Временные гидрохимические аномалии характеризуются вариациями химического состава и в отдельные периоды могут исчезать. Эти аномалии, как правило, встречаются в поверхностных и неглубоких грунтовых водах в районах с неравномерным грунтовым питанием и стоком (например, высокогорье). Постоянные гидрохимические аномалии обычно отмечаются для вод глубоких водоносных горизонтов с более стабильным режимом. Естественно, что их характеристики во времени также более постоянны. Ведущими процессами формирования водных ореолов рассеяния элементов-индикаторов месторождений являются реакции окисления, сернокислотного и углекислотного разложения, растворение и гидролиз. Окисление и сернокислотное разложение более характерны для группы сульфидных месторождений. Эти процессы протекают наиболее активно на небольших глубинах при взаимодействии кислородонасыщенных вод с рудными минералами в зоне активного водообмена.

В отличие от процессов окисления и сернокислотного разложения, углекислотное разложение, гидролиз и обычное растворение усиливаются с глубиной при повышении температуры и давления в бескислородной среде. Эти природные процессы имеют наиболее важное значение при образовании водных ореолов рассеяния несulfидных или малосulfидных месторождений. До последнего времени гидрогеохимические поиски более успешно использовались для выявления месторождений сульфидной группы с интенсивными и протяженными водными ореолами рассеяния элементов, образующихся за счет окисления и выноса легко растворимых сульфидных соединений. Позднее была установлена возможность поисков по водным ореолам рассеяния элементов-индикаторов месторождений таких элементов, как бериллий, бор, литий, уран, фтор, вольфрам и др. (табл. 19).

Контрастность и размеры водных ореолов рассеяния определяются множеством причин, важнейшими из которых являются:

1. Морфология и состав руд и ореолов;
2. Литологический состав, плотность и проницаемость вмещающих и перекрывающих толщ;
3. Гидрогеология и палеогидрогеология района;
4. Физико-химические особенности и формы миграции элементов в природных водах;
5. Геохимическая среда в зоне миграции.

При неглубоком залегании рудных тел их водные ореолы рассеяния в процессе формирования испытывают воздействие местных ландшафтно-геохимических факторов. Ореолы глубоко залегающих рудных тел формируются в водах регионального стока, которые испытывают влияние разнообразных термодинамических и геохимических процессов, протекающих на данных глубинах, и поэтому менее подвержены воздействию местных ландшафтно-геохимических особенностей. В зависимости от гео-

Таблица 19. Наиболее распространенные гидрохимические поисковые ассоциации основных типов рудных месторождений [26]

Тип месторождения	Поисковая ассоциация	Сопутствующие микрокомпоненты
Медноколчеданные (медные и медноцинковые)	Cu, Zn, Pb, As, Mo	Ca, Ni, Ag, B, F, Sc, Ge, U
Полиметаллические	Pb, Zn, Ag, Cu, Mo, Cd, Sb	Sn, Ni, Co, Sc, Ba, Sr, B, F, U
Медно-молибденовые (порфиновые)	Mo, Cu, Ag	As, Zn, Co
Титано-магнетитовые	Ti, Fe	Ni, Co, Cr
Барито-халькопиритовые	Ba, Sr, Cu	Zn, Pb, As
Медно-никелевые	Ni, Cu, Zn, Co, Ag	Ba, Sn, Pb, U
Золоторудные	Au, Ag, Sb, As	Sn, Cu, Ni, Co, Pb, Mo
Оловорудные	Sn, Nb	W, Pb, Cu, Zn, Li, F
Ртутные, сурьмяно-ртутные	Hg, Sb, As	Ag, Se, Cu, Zn, B, F
Вольфрамо-молибденовые	W, Mo, Zn, Cu	—
Вольфрамо-касситеритовые	W, Sn	F, Nb, TR, Be, Cu, Zn
Вольфрамо-бериллиевые	W, Be, Li, F	Nb, Sn, Cu, Zn
Сподумено-лепидолитовые	Li, Rb, Cs, F, Sn, Nb	Be, Cu, Zn, As, TR
Бериллиево-флюоритовые	Be, F	Li, Rb
Ниобиево-танталовые	Nb, TR, F, Li, Rb	Be, Sn

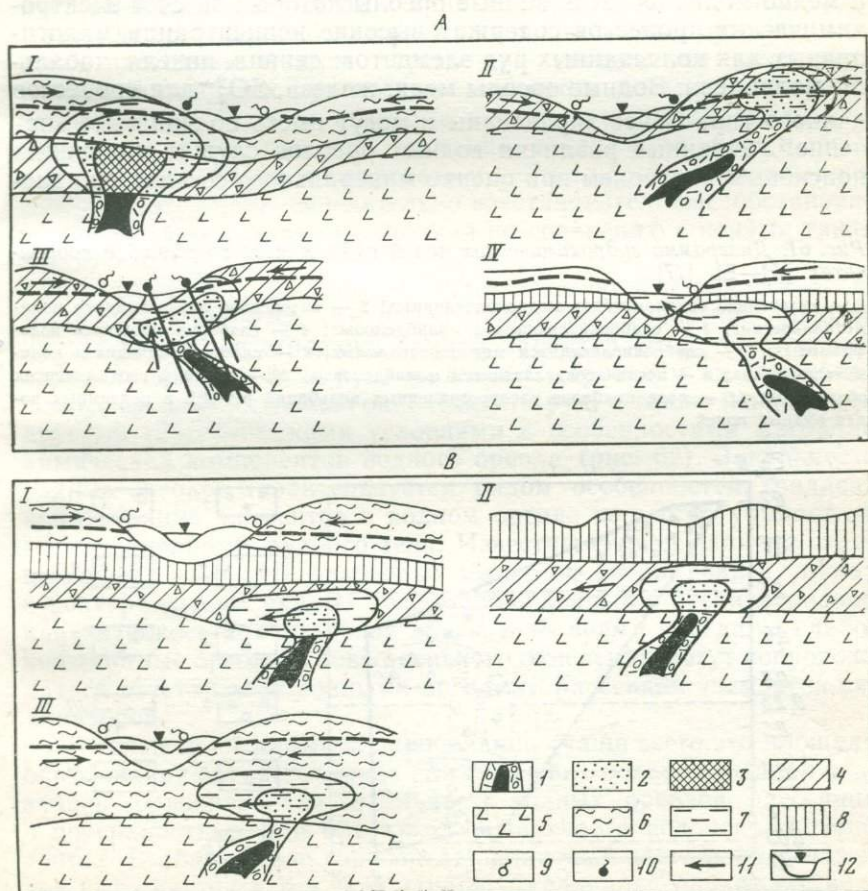
морфологических, гидрогеологических и структурных особенностей залегания рудных тел водные ореолы рассеяния принято разделять на открытые и закрытые (рис. 60), по Г. А. Голевой. К открытым водным ореолам относятся те, которые имеют выход на поверхность в виде очагов разгрузки ореольных вод (родники, заболоченности, колодцы и т. д.). К закрытым водным ореолам относятся гидрохимические аномальные образования, расположенные ниже уровня местного базиса эрозии, обычно в слабо расчлененных предгорных и равнинных областях. Эти водные ореолы не вскрыты современной эрозией и не имеют выхода в поверхностные водопоявления.

Точность установления источника рудных концентраций такого типа ореолов зависит от наличия сведений о простирании, углах падения и глубине раскрытия водоносных структур, а также геоморфологических и геологоструктурных условий залегания рудных тел. Наиболее контрастные водные ореолы отмечаются при окислении сульфидных (колчеданных) руд, обогащенных дисульфидами железа, залегающих выше местного базиса эрозии в зоне активного водообмена. Окислительные процессы подобного типа детально изучены В. Эммонсом [93] и С. С. Смирновым [77]. При наличии в водах достаточных количеств растворимого кислорода происходит интенсивное окисление пирита и пирротина с образованием свободной серной кислоты, понижающей

pH вод, сульфатов железа и ионов серы различной валентности. Свободная серная кислота образуется также при окислении халькозина, арсенопирита, буланжерита, энаргита. Кислые агрессивные сульфатные воды (pH 1,0—4,0) воздействуют на руды и вмещающие породы и обогащаются рудогенными элементами, а также солями алюминия, железа, кальция, натрия, магния и др. Из этого разнообразного комплекса элементов-индикаторов

Рис. 60. Типы водных ореолов рассеяния скрытого оруденения (по Г. А. Голевой)

А — открытые ореолы; В — закрытые ореолы; 1 — рудное тело и его первичный ореол рассеяния; 2 — вторичный ореол рассеяния; 3 — окисленные руды (железная шляпа); 4 — кора выветривания (водопроницаемая трещиноватая порода); 5 — рудовмещающие коренные породы; 6 — осадочные водоносные породы; 7 — водный ореол рассеяния; 8 — водоупорный горизонт; 9, 10 — источники грунтовых вод соответственно с фоновым и аномальным содержанием гидрохимических поисковых признаков; 11 — направление движения вод; 12 — местный базис эрозии

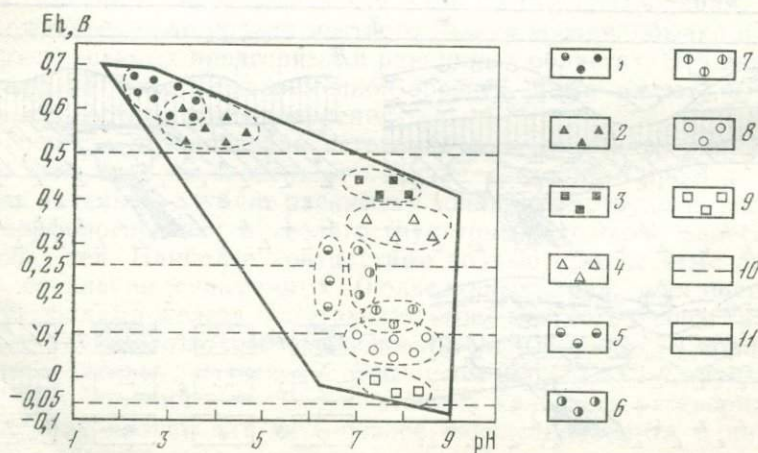


в водных ореолах исключение составляют лишь соединения, неустойчивые в резко кислой среде (MoO_4^{2-} , WO_4^{2-} и др.). В кислых рудных водах ($\text{pH} < 4,0$) максимальные содержания (в мг/л) меди и цинка достигают $n \cdot 10^{-3}$, свинца — $n \cdot 10^1$, мышьяка — $n \cdot 10^2$, кобальта — $n \cdot 10^1$, никеля — $n \cdot 10^1$, причем комплекс элементов-индикаторов в водных ореолах подобного типа наиболее разнообразный.

Наряду с водными ореолами химического происхождения, на месторождениях полиминерального состава с достаточно высокой электронной проводимостью и различными электродными потенциалами входящих в состав руды сульфидов происходит активное электрохимическое растворение относительно электроотрицательных минералов и дополнительное обогащение фильтрующихся природных вод ионами тяжелых металлов. Особенно велика роль электрохимического растворения в формировании водных ореолов для месторождений полиэлементного состава, таких как свинцово-цинковые, медно-цинковые, медно-никелевые и медно-молибденовые, водные ореолы которых за счет электрохимических процессов содержат высокие концентрации малотипичных для колчеданных руд элементов: свинца, никеля, кобальта, молибдена. Водные ореолы меди, железа, SO_4^{2-} для процессов данного типа менее характерны и могут иметь подчиненное значение. Указанные различия водных ореолов служат надежным поисковым критерием при оценке минерального состава ожидае-

Рис. 61. Диаграмма гидрохимических полей рудных месторождений в координатах $\text{pH}-\text{Eh}$ [17]

1 — интенсивно окисляющихся медноколчеданных; 2 — интенсивно окисляющихся полиметаллических; 3 — слабоокисляющихся молибденовых; 4 — слабоокисляющихся вольфрамовых; 5 — слабоокисляющихся медноколчеданных; 6 — слабоокисляющихся полиметаллических; 9 — почти неокисляющихся молибденовых; 10 — границы геохимических обстановок; 11 — поле наиболее распространенных колебаний $\text{pH}-\text{Eh}$ в подземных водах рудных полей



мого оруденения по водным растворам (рис. 61). Менее контрастные водные ореолы рассеяния образуются при взаимодействии грунтовых вод со слабо окисляющимися сульфидными (зона замедленного водообмена ниже местного базиса эрозии) или несulfидными рудными залежами, даже при неглубоком их залегании от современной поверхности.

Элементный состав водных ореолов этого типа обычно более ограничен и включает в себя лишь основные рудообразующие металлы и их ближайшие спутники. Контрастность водных ореолов в данном случае (относительно фона) не превышает нескольких единиц, реже десятков. Для сравнения заметим, что контрастность их аналогов на интенсивно окисляющихся рудах достигает десятков и сотен тысяч единиц. Размеры водных ореолов вокруг слабо окисляющихся рудных залежей и их первичных ореолов, как правило, невелики (несколько сотен метров). При этом наличие в районе толщ химически активных пород (известняки, доломиты и т. п.) нейтрализует водные потоки и способствует выпадению металлов в виде карбонатов и основных сульфатов, что еще более осложняет фиксацию водных ореолов и потоков рассеяния. В этом случае при уменьшении активности миграции основных рудоносных элементов большее поисковое значение приобретают сквозные элементы-спутники (молибден, мышьяк, сурьма, ванадий, германий, селен, фтор, бор и др.), способные свободно мигрировать в нейтральных и щелочных водах в переходной окислительно-восстановительной обстановке на более значительные расстояния по сравнению с ионами тяжелых металлов.

По данным Г. А. Голевой [26], водные ореолы рассеяния химических элементов, как и первичные геохимические ореолы, имеют зональное строение, причем характер этой зональности определяется составом руд, зональным строением их литохимических ореолов, степенью окисленности руд, а также некоторыми другими геохимическими условиями и особенностями миграции химических компонентов водного ореола (рис. 62). Зональность водных ореолов характеризуется рядом особенностей: градиент концентрации элементов в водном ореоле не всегда убывает по мере удаления от рудного тела. Известны случаи наличия отрицательных аномалий некоторых металлов (медь, свинец, цинк) в контуре слепых рудных тел, расположенных в бескислородной или слабовосстановительной среде, в то время как даже слабоконтрастные ореолы в зоне активного окисления могут сопровождаться отчетливыми водными ореолами рассеяния элементов-индикаторов.

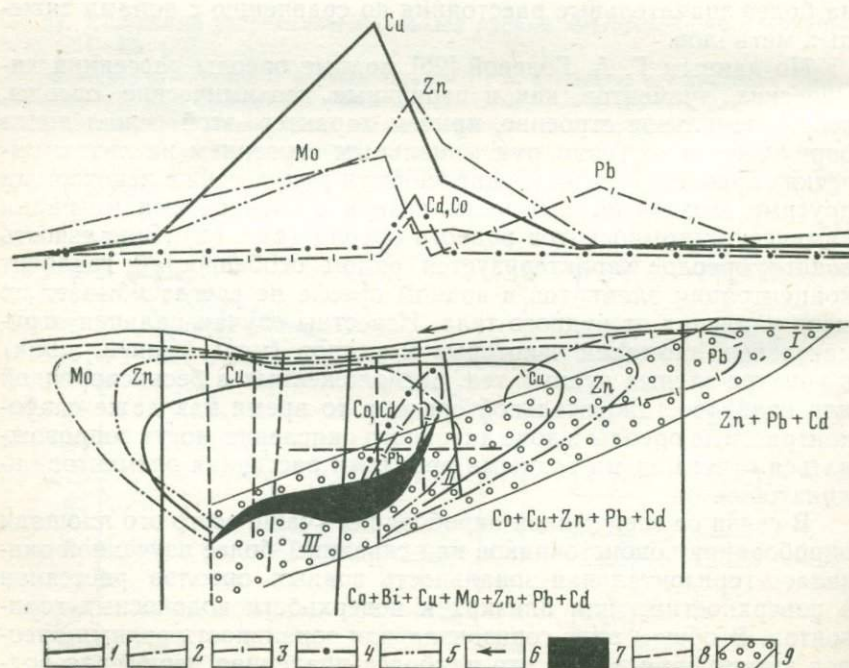
В связи со спецификой опробования (чаще всего это площади опробования водоисточников или скважин) более изученной оказалась горизонтальная зональность водных ореолов рассеяния в поверхностных или близких к поверхности водоносных горизонтах. В общем виде горизонтальная зональность водных ореолов выражается в том, что наиболее удаленная периферия вод-

ного ореола характеризуется совместным нахождением в водах относительно более подвижных элементов, таких как цинк, молибден, мышьяк, фтор, бор, йод, а также сульфат-ион. Размеры водных потоков этих элементов в аллювиальных водоносных горизонтах с хорошей фильтрацией достаточно велики и могут достигать 2—3 км. В грунтово-трещинных водах с меньшим разбавлением и более замедленной циркуляцией ореолы перечисленных элементов менее обширны по площади, но отличаются большей контрастностью. Промежуточная зона водных ореолов сульфидных залежей характеризуется наличием меди, свинца, селена, германия и др., площадные размеры водных ореолов которых обычно намного меньше, чем у элементов ранее перечисленной группы.

В околорудном пространстве в водных ореолах в дополнение к приведенному перечню элементов также фиксируются аномальные концентрации кадмия, сурьмы, висмута и кобальта. В аллювиальных потоках эти элементы редко встречаются в аномальных количествах. Поэтому их сочетание с основными рудогенны-

Рис. 62. Геохимическая зональность водных и эндогенных ореолов на примере скрытого медноколчеданного оруденения (по Г. А. Голевой)

Контуры водных ореолов: 1 — меди; 2 — свинца; 3 — 4 — кадмия и кобальта; 5 — цинка; 6 — направление движения ореольных вод в коре выветривания рудовмещающих пород; 7 — рудная залежь; 8 — уровень грунтово-трещинных вод; 9 — эндогенный ореол. Зоны: I — надрудная, II — околорудная, III — подрудная



ми элементами в источниках может свидетельствовать о непосредственной близости окисленной рудной залежи. Необходимо отметить, что описанная картина горизонтальной зональности водных ореолов в аллювиальных и грунтово-трещинных водах часто осложняется при разгрузке трещинно-жилльных вод по зонам тектонических нарушений, а также контактом воздействия вод с гидротермально-измененными породами и дайками, обычно широко развитыми в пределах рудных полей. Вертикальная гидрохимическая зональность находит свое выражение в том, что в верхних, более кислородонасыщенных интервалах водоносной толщи реакции окисления и разложения более интенсивны, в связи с чем элементный состав водных ореолов включает больший набор компонентов, а их контрастность более значительна по сравнению с водными ореолами, развитыми в глубоких интервалах рудолокализирующей структуры.

Изучение водных ореолов различных месторождений полезных ископаемых показывает, что гидрохимические методы поисков с успехом могут быть применены в закрытых районах с двухъярусным геологическим строением с покровом аллохтонных образований более 10—50 м, когда применение других массовых методов поисковой геохимии (литохимические поиски по первичным и вторичным ореолам) затруднено. Многочисленные методические разработки показали, что при благоприятных гидрогеологических условиях гидрохимическое опробование может дать положительные результаты при самых различных масштабах поисковых и разведочных работ, вплоть до последних стадий разведки рудных месторождений. Однако наиболее оправдано его применение при мелко- и среднемасштабных съемках для прогнозной оценки перспектив рудоносности значительных по размеру площадей. В этом случае комплексирование гидрохимического метода со шлиховым опробованием, поисками по литохимическим потокам рассеяния и приемлемыми вариантами литохимического опробования (по речной сети, частично вскрывающей образования нижнего структурного яруса) позволяет получить достаточно полную геохимическую характеристику вероятной рудоносности обширных территорий в относительно короткие сроки. Поисковая ценность гидрогеохимического метода особенно возрастает в условиях горных (раскрытых), предгорных и равнинных (полузакрытых) районов с достаточно высокой обводненностью и неглубоким залеганием коренных пород.

В средне- и высокогорных районах водные потоки рассеяния от рудных концентраций формируются в условиях активного водообмена при резко варьирующей мощности рыхлых образований. Конфигурация водных потоков обусловлена характером современного и погребенного рельефа, а также особенностями зон повышенной трещиноватости в коренных породах. Протяженность водных потоков данного типа, как правило, невелика (менее 1,5 км), причем по оси потока фиксируется отчетливо выраженная зональность. Так, по данным С. Р. Крайнова и др.

[25], в нейтральных и кислых аллювиальных водах дальность миграции кобальта, бария и вольфрама от рудного источника минимальна и не превышает нескольких сотен метров в основном из-за активной сорбции этих элементов на геохимических барьерах. В подобной обстановке на более значительные расстояния способны мигрировать такие элементы, как цинк, мышьяк, сурьма, медь, серебро.

В аллювиальных водах горных районов с гумидным климатом содержание SO_4^{2-} незначительно, а воды кислого состава также не характерны и не могут служить поисковыми критериями. Главными поисковыми признаками здесь служат концентрации рудогенных элементов, что позволяет оперативно и надежно локализовать перспективные для дальнейших поисков площади. Весьма ценную информацию дает опробование грунтовых вод в районах развития мощных курумников и осыпей, существенно затрудняющих применение других поисковых методов.

По сравнению с горноскладчатыми регионами, в полузакрытых территориях с перекрывающими нижний структурный этаж рыхлыми отложениями различной мощности, выходы подземных вод нижнего яруса встречаются значительно реже, а геохимический состав естественных водоисточников глубинных вод часто из-за разбавления последними водами покровных отложений отличается от первичного состава этих вод. В этих условиях для получения информации о составе вод различных структурных этажей необходимо вскрытие водоносных горизонтов системой скважин. По гидрогеологическим особенностям формирования и химическому составу в полузакрытых районах обычно выделяют два типа вод: воды зоны активного и затрудненного водообмена. К первому типу принадлежат воды покровных образований, реже коренных пород на участках поднятий. Питание происходит за счет атмосферных осадков, иногда за счет разгрузки более глубинных напорных вод. По химическому составу обычно это гидрокарбонатно-кальциевые воды (рН 6,5—7,5). По составу микрокомпонентов они отражают особенности минерального состава рыхлой толщи, реже выветрелой или трещиноватой кровли коренных пород.

Воды второго типа локализируются в отложениях нижележащего структурного яруса и частично в рыхлых породах в зонах глубокого погружения фундамента. Они отличаются более высокой общей минерализацией (замедленный водообмен) и слабощелочной (рН 7,0) реакцией. Концентрации микрокомпонентов, даже в области фона, имеют более высокие значения по сравнению с более высокими уровнями. Наличие многочисленных тектонических структур и зон трещиноватостей приводит к смешению различных типов вод в областях разгрузки, что обуславливает весьма сложную картину миграции микрокомпонентов, а следовательно, и формирования водных ореолов рудных тел.

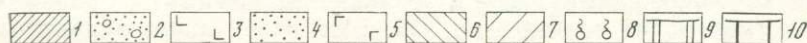
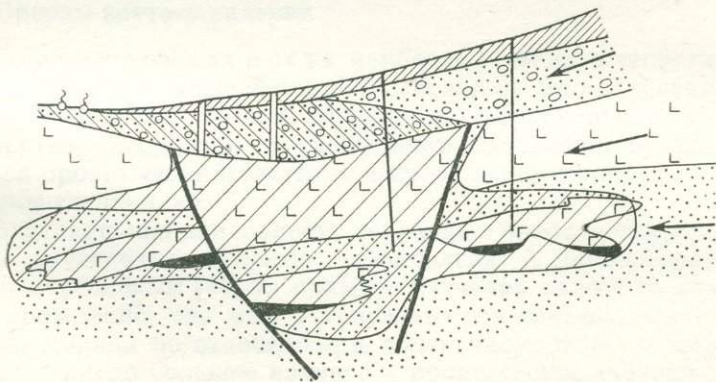
Рудные залежи, локализующиеся в зонах тектонических нарушений, обычно фиксируются водными ореолами рассеяния хи-

мических ореолов, вытянутыми по направлению движения пластовых вод. Их ширина определяется мощностью зон дробления и миграционными характеристиками образующих ореолы элементов-индикаторов. Форма водных ореолов и их протяженность определяется системой разгрузки трещинных вод в соответствующих водоносных горизонтах. На рис. 63 в качестве примера показана схема формирования водных ореолов рассеяния на Талпахском месторождении [86]. Как видно из рисунка 63, существенным преимуществом гидрохимического метода поисков является его значительная глубинность, позволяющая фиксировать в зонах разгрузки глубинных вод контрастные водные ореолы рудных залежей скрытых на значительной глубине.

В заключение отметим, что успехи в разработке научных и методических основ гидрохимических поисков рудных месторождений не оставляют сомнений в информативности гидрохимического метода и целесообразности его широкого применения при поисках рудных месторождений. Наряду с этим нельзя не заметить, что, несмотря на многолетнюю историю применения, крайне мало убедительных примеров успешных поисков рудных месторождений с помощью гидрохимического метода. Низкая эффективность гидрохимического метода обусловлена исключительно сложным и во многом неясным механизмом формирования гидрохимических аномалий рудных залежей. В связи с тем, что на формирование водных ореолов оказывает влияние мно-

Рис. 63. Схема формирования водных ореолов рассеяния на Талпахском месторождении [60]

1 — ледниковые водоупорные суглинки; 2 — ледниковые песчано-галечниковые отложения; 3 — базальты различного состава; 4 — алевролиты, аргиллиты, песчаники; 5 — габбро-диабазы; 6 — водный поток рассеяния в рыхлых образованиях; 7 — водный поток рассеяния в коренных породах; 8 — источники с аномальным содержанием тяжелых металлов; 9 — скважины, вскрывшие аномальные воды в рыхлых отложениях; 10 — те же, в коренных породах



жество факторов, пространственные взаимоотношения рудных тел и водных ореолов рассеяния элементов-индикаторов не являются стабильными. Это обстоятельство резко затрудняет интерпретацию выявленных в результате гидрохимического опробования водных ореолов, прежде всего, в части локализации по данным гидрохимического опробования участков размещения рудных тел. Не менее существенной помехой для решения этой задачи является ярко выраженная конвергентность гидрохимических аномалий, когда сходные по элементному составу и другим параметрам аномалии имеют разные источники и различный механизм формирования. Отмеченные особенности формирования водных ореолов рассеяния элементов-индикаторов рудных месторождений свидетельствуют о том, что на современном уровне развития гидрохимический метод может быть использован на стадии относительно мелкомасштабных поисков для локализации перспективных участков, дальнейшая оценка которых уже потребует применения других методов и, в частности, литохимических. В этой связи возникает проблема разработки принципов комплексирования на стадии мелкомасштабных поисков различных методов, в том числе и геохимических. Речь по существу идет о разработке научных основ комплексирования трех конкурирующих методов: гидрохимического, шлихового и метода литохимических потоков рассеяния элементов-индикаторов. Успешное решение этой задачи потребует выполнения (применительно к типоморфным ландшафтно-геохимическим и металлогеническим обстановкам) исследований по изучению гидрохимических, литохимических и шлиховых потоков рассеяния в комплексе с детальным площадным, литохимическим опробованием в пределах рудоносных участков (известных месторождений и рудопроявлений) с целью оценки информативности каждого из рассматриваемых методов и разработки на этой основе принципов их рационального комплексирования.

КРИТЕРИИ И МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭРОЗИОННОГО СРЕЗА ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

При оценке уровня эрозионного среза геохимических аномалий и рудопроявлений используется геохимическая зональность первичных ореолов. Как отмечалось выше, при описании методики изучения первичных ореолов, в практическом отношении удобнее рассматривать три основных типа зональности первичных ореолов рудных залежей: осевая зональность, которая проявляется в направлении движения рудоносных растворов и в случае крутого падения оруденения совпадает с вертикальной зональностью; продольная зональность отражает зональное строение ореолов по их простиранию, а поперечная — вкрест простирания ореолов. Особенности проявления геохимической зональности первичных ореолов в пространстве контролируются различными факторами, среди которых не последнее место занимает геологоструктурные условия локализации оруденения, определяющие морфологию ореолов и условия залегания рудных залежей. В связи с этим особенности зонального строения первичных ореолов рассматриваются для рудных тел и ореолов крутого (субвертикального) и пологого (субгоризонтального) залегания.

Ореолы крутого падения

Осевая зональность наиболее важная в теоретическом и практическом отношении. Во избежание многочисленных повторений в тексте осевая зональность (вертикальная в случае субвертикальных тел) в дальнейшем изложении будет именоваться просто «зональностью», а продольная и поперечная — отмечены специально.

Вертикальная зональность первичных ореолов гидротермального оруденения впервые установлена А. Д. Каблуковым и Г. И. Вертеповым [41] на примере изучения одного из урановых месторождений, где ими установлен отчетливый сдвиг вверх ореола свинца по отношению к полю аномальных содержаний урана. Однако большое научное и практическое значение вертикальной геохимической зональности первичных ореолов получило признание лишь после того, как на примере гидротермальных

урановых (настуран-молибденитовая формация) месторождений было установлено существование единой для месторождений этой формации зональности первичных геохимических ореолов, которая выражалась следующим рядом основных элементов-индикаторов (от надрудных сечений ореолов к подрудным): серебро — свинец — цинк — медь — молибден — уран (Григорян, 1963). В последующем существование единой для месторождений одной рудной формации геохимической зональности первичных ореолов было доказано для скарново-полиметаллических (Григорян, 1963), ртутных, золоторудных, оловорудных, скарново-шеелитовых и других типов месторождений (Овчинников, Григорян, 1970). Единая геохимическая зональность первичных ореолов месторождений различных рудных формаций иллюстрируется рядами элементов, приведенных в табл. 20. Рассмотрим некоторые примеры, иллюстрирующие вертикальную зональность первичных ореолов.

Месторождение Восточный Канимансур расположено в Центральном Карамазаре на южном склоне Кураминского хребта (Таджикская ССР). Рудное поле в основном сложено эффузивными породами верхнего палеозоя. Рудовмещающие вулканогенные породы верхнепалеозойского возраста представлены туфолавами, туфобрекчиями кварцевых порфиров, флюидалными фельзит-порфирами, андезитовыми порфиритами, кварцевыми порфирами. Эти породы прорваны большим количеством даек фельзит-порфиров, кварцевых порфиров и диабазовых порфиритов. В структурном отношении месторождение приурочено к юго-восточному крылу Тавакской антиклинали, осложненной серией разломов северо-восточного, либо широтного простирания с падением на юг-юго-восток под углами 70—90°. Разломы представлены мощными зонами дробленых и гидротермально-измененных пород, местами с кварцем, баритом, флюоритом и сульфидами. Многочисленные трещины оперения наряду с основными разломами контролируют размещение рудных тел. Рудные тела приурочены к Главному разлому, разлому Южная ветвь, к оперяющим их трещинам и имеют линзообразные формы с многочисленными апофизами. Минеральный состав медно-висмутовых руд: халькопирит, пирит, висмутин, козалит, айкинит, в меньших количествах — арсенопирит, блеклая руда, сфалерит, галенит, сульфосоли серебра; жильные минералы представлены кварцем и флюоритом. Основными минералами свинцово-серебряных руд являются галенит, сфалерит, пирит, арсенопирит, халькопирит, блеклая руда, стефанит, а из жильных — кварц, барит, флюорит.

Как показали результаты обработки данных опробования, вокруг рудных тел месторождения развиваются ореолы большого круга химических элементов. На рис. 64 изображены первичные ореолы, оконтуренные вокруг зоны Главной. В этой зоне рудные тела серебряно-свинцового состава (группа сближенных рудных тел) залегают близко к поверхности и с глубиной переходят

Таблица 20. Ряды зональности элементов-индикаторов различных по составу рудных месторождений

Тип месторождений	Ряды зональности основных элементов-индикаторов
Медно-никелевые Кольского района Норильского района	(Ba—Ag)*—Pb—Zn—Cu—Ni—Co (Zr—Sn—Ti)—Pb—Ba—(Mo—Ag)—Cu—Ni—Co
Редкометалльные пегматиты	As—Li—Rb—Cs—Sn—Ta—Nb—W
Вольфрамовые Скарново-шеелитовые Грейзеновые Кварц-гюбнеритовые Кварц-шеелитовые	(Ag, Pb) + Zn—(Mo, Bi) Sn, Ba, W (Cu, Pb, Zn), W, Bi, Sn, Be, I Zn, W, Co (Be, Sn), Bi Ag, Sn, Be I (Bi, Mo, W)
Оловорудные Кварцево-касситеритовые Сульфидно-касситеритовые	Pb, Ag, Zn), Cu, Sn, B (W, Be, As) (Pb, Ag, Zn), (Cu, Zn), (Co,* As, Mo, W) Ba, As ¹ , Ag, Pb, Zn, Cu, As ² , Co, Mo
Медно-колчеданные Полиметаллические Скарновые Жильные	Ba (As, Sb), Ag, Ph, Zn, Cu, Bi, Co (Mo, W), Sr Ba, As ¹ , Ag, Pb, Zn, Cu, Bi, Co, Sn, As ² , W
Золоторудные Высокотемпературные Среднетемпературные Низкотемпературные	(Sb, As ¹ , Ag, Pb), Zn, C (Co, Ni, As ² , Au, W, Be) (Sb, As, Ag), Pb, Zn, Au, Cu (M Sn), Bi (Be, W, Co) Hg, Ba (Sb, As), Ag, Au, Pb (Zn, Cu), Mo (Sn, Bi, W)
Медно-порфировые	Ba, As, Sb (Ag, Pb, Zn), Au, Bi (Cu, Mo), (Sn, Co, W, B)
Медные (жильные)	Ba, Ag, Pb, Zn (Ag, Sn), Cu, Bi, Co, Ni
Урановые (настуран- сульфидной формации)	Ag, Pb, Zn, Cu, Mo ^{2*}
Стратиформные свинцово-цинковые	Ba, As, Cu, Ag, Pb, Zn, Co, Ni, Be
Ртутные	(Sb, As, Hg), Ag, Pb, Zn, Cu (Mo, Bi),
Сурьмяно-ртутные	(Co, Ni, W, Sn) Hg (As, Sb), Ag, Sn, Pb, Zn, Cu, Mo (W, Co, Ni)

* Взаимоотношения элементов, заключенных в скобки, в ряду не установлены.

* На этих месторождениях изучены ореолы ограниченного круга элементов-индикаторов.

в медно-висмутовое оруденение. Первичные ореолы большинства элементов-индикаторов по ширине намного превосходят рудные тела. О вертикальной протяженности ореолов трудно судить, поскольку из-за неглубокого залегания рудных тел по существу выяснены особенности распределения элементов-индикаторов только на уровне рудных тел. Тем не менее, в строении первичных ореолов проявляется отчетливая вертикальная зональность.

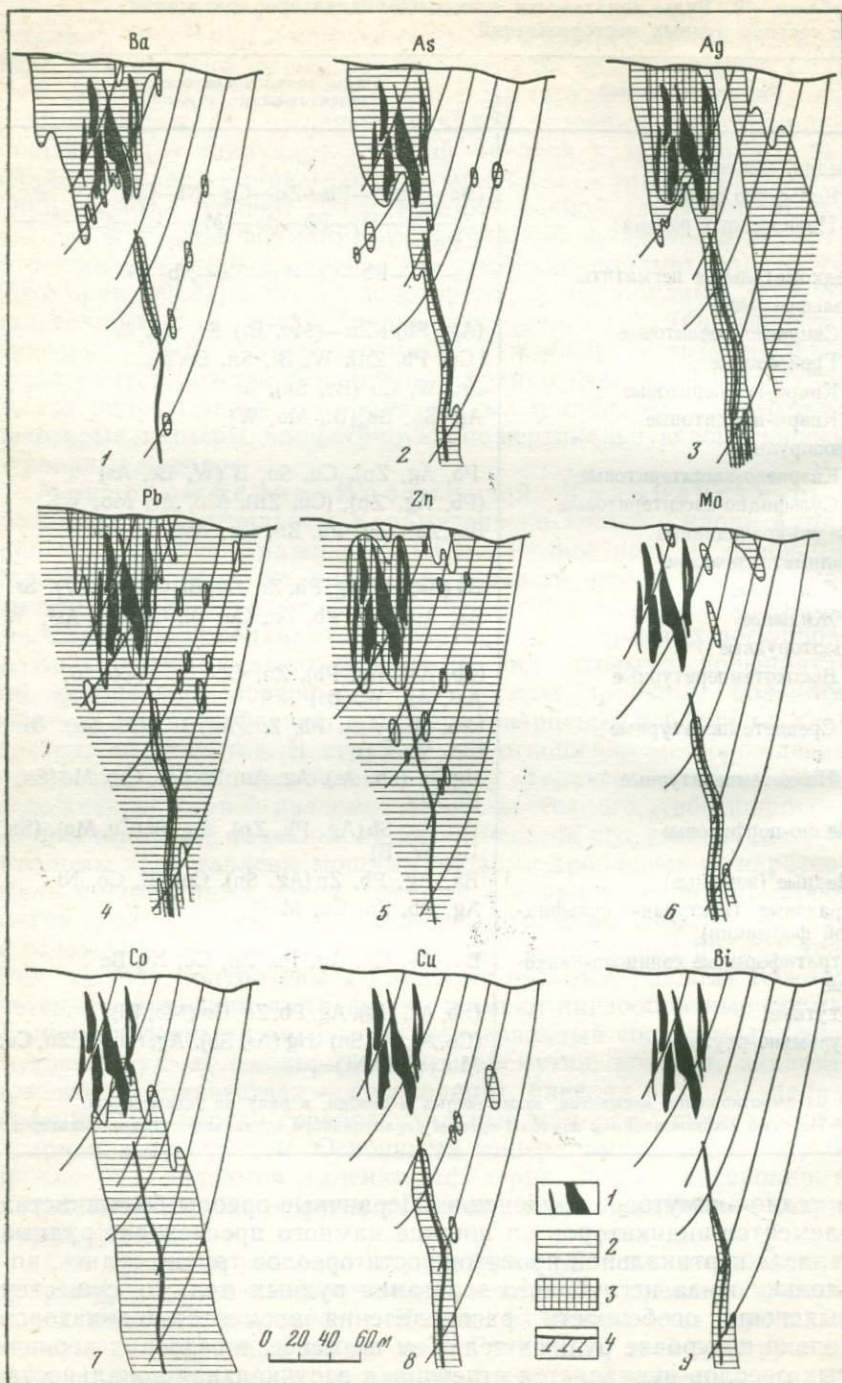


Рис. 64. Первичные ореолы в разрезе (полиметаллическое месторождение Восточной Канимансур)

1 — рудные тела; 2, 3 — первичные ореолы (3 — поля повышенных содержаний);
4 — опробованные буровые скважины

Такие элементы, как барий, серебро и частично свинец образуют весьма широкие и контрастные ореолы только в верхних частях разреза: на уровне свинцово-серебряных рудных тел и выше. Вниз по падению рудных тел ореолы этих элементов резко сужаются. Наиболее резко выклиниваются ореолы бария и серебра. В отличие от них ореолы меди, висмута, кобальта, молибдена, олова и вольфрама развиваются практически только в нижней части разреза. Наиболее наглядно вертикальную зональность в распределении элементов отражают пары барий, серебро — кобальт, вольфрам. Ореолы этих элементов как бы представляют собой зеркальное отражение друг друга.

Скарново-полиметаллическое месторождение Курусай расположено в северо-западном окончании Курусайской гряды (Таджикская ССР). Вмещающие породы — мраморы турнейского яруса, прорванные небольшими дайками и штокообразными телами кварцевых порфиров, сиенит-порфиров, авгитовых порфиритов и других изверженных пород. Месторождение приурочено к участку сопряжения крутопадающих коротких трещин отрыва северо-восточного простирания с Главным рудным разломом меридионального направления и состоит из сложно ветвящихся оруденелых скарновых тел трубчатой формы. Установлено два типа скарнов: возникшие на контакте мраморов с изверженными породами и инфильтрационного типа в мраморах. Последние представлены гранатами андрадитовой и андрадит-гроссуляровой группы и пироксеном (манган-геденбергитом; 84).

На рис. 65 изображены первичные ореолы, развитые вокруг слепого рудного тела месторождения Курусай-1. По этому разрезу, как и по многим другим, выявлены первичные ореолы широкого круга элементов, из которых ореолы бария, свинца, меди и висмута прослежены на значительную глубину (более 600 м). Зональность в строении ореолов выражается в накоплении бария исключительно в верхних частях околорудного пространства, а висмута — в нижней, на уровне выклинивания рудного тела. Для ореола меди устанавливается отчетливое усиление и расширение с глубиной. Как видно из рис. 65, северо-восточнее ореолов, окаймляющих известное рудное тело, выявлена вторая полоса аномальных содержаний ряда элементов. Развитие в пределах этой полосы широкой и интенсивной аномалии бария (в меньшей степени свинца) и практически полное отсутствие меди и особенно висмута (индикаторов подрудных частей ореолов), позволяют считать эти аномалии надрудными ореолами вероятного слепого

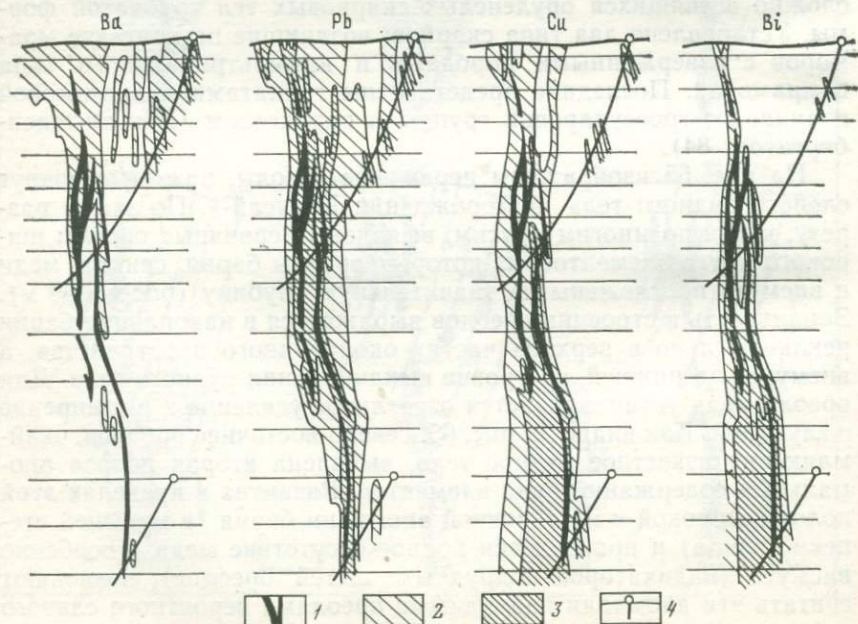
оруденения, расположенного северо-восточнее известного рудного тела.

Агятагское ртутное месторождение расположено в восточной части Азербайджанской ССР, в пределах Севано-Карабахского ртутного пояса. Вмещающие породы на месторождении представлены преимущественно тектоническими брекчиями, частично кремнистыми бурыми аргиллитами, дацитами, серпентинитами и лиственитами. Ртутное оруденение прожилково-вкрапленное, характеризуется резко неравномерным распределением и приурочено к тектоническим брекчиям аргиллитов.

На рис. 66 изображены ореолы, выявленные на Центральном участке месторождения по результатам опробования коренных пород на поверхности и в подземных горных выработках. Они весьма слабо контрастны (в отличие от ореолов, рассмотренных выше полиметаллических месторождений), тем не менее в их строении выявляется отчетливая вертикальная зональность. По особенностям распределения элементов по вертикали можно выделить две группы: ртуть, мышьяк, медь, свинец, и в меньшей степени олово, образуют ореолы, для которых характерно уменьшение с глубиной как ширины, так и интенсивности. Ореолы никеля, кобальта, молибдена, бериллия и вольфрама, напротив,

Рис. 65. Первичные ореолы в разрезе (скарново-полиметаллическое месторождение Курусай I)

1 — рудные тела; 2, 3 — первичные ореолы; 3 — поля повышенных содержаний;
4 — буровые скважины

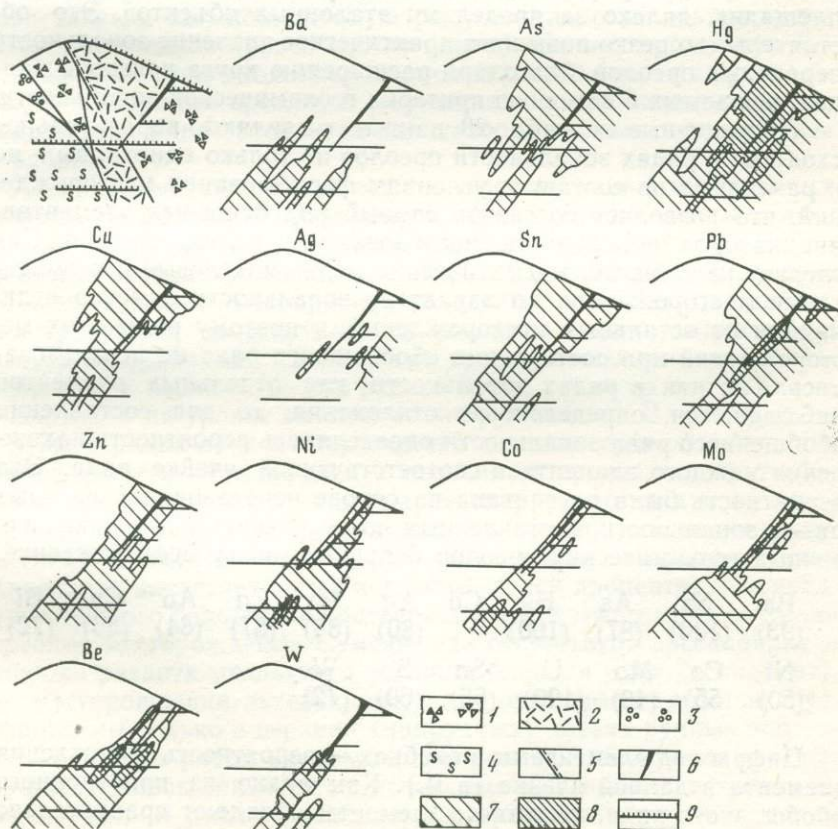


с глубиной расширяются. Цинк отчетливого избирательного накопления по вертикали не обнаруживает. Установлена интересная особенность распределения бария, который на описанных выше полиметаллических месторождениях постоянно образует надрудные ореолы. В отличие от этого по описанному разрезу установлены отчетливые ореолы выноса (на рис. 66 штриховкой показаны фоновые содержания этого элемента). Подобное двойственное поведение бария (вынос из нижних горизонтов и привнос в надрудные части ореолов) установлено и на ряде других месторождений. Этот вопрос более подробно будет рассмотрен ниже.

Ряды элементов-индикаторов осевой зональности, приведенные в табл. 20, составлены по рассмотренной выше методике показателя зональности. В этих рядах слева направо происходит

Рис. 66. Первичные ореолы в разрезе (ртутное месторождение Агятаг)

1 — тектонические брекчии; 2 — дациты; 3 — листвениты; 4 — габброиды; 5 — дизъюнктивные нарушения; 6 — рудное тело; 7, 8 — первичные ореолы (8 — поля повышенных содержаний); 9 — интервалы опробования



смена надрудных элементов подрудными. Сравнение приведенных в табл. 20 данных выявляет практически полную идентичность рядов зональности месторождений одной и близких по составу рудных формаций (ртутные, полиметаллические и др.). Это обстоятельство имеет большое практическое значение, поскольку представляет возможность использовать при интерпретации геохимических аномалий, связанных с теми или иными рудными формациями, единые индикаторные отношения.

Существование единой для первичных ореолов месторождений одной или близких по составу рудных формаций зональности создает условия для применения критерия зональности ореолов на качественно новом уровне. До установления единой зональности использование критерия зональности ограничивалось ближайшими флангами известных эталонных месторождений, для оценки рудоносности которых использовались особенности строения ореолов, изученных вокруг расположенных недалеко известных рудных тел. После того, как была установлена единая зональность, этот критерий с успехом может быть использован также при интерпретации геохимических аномалий на новых площадях, далеко за пределами эталонных объектов. Это обстоятельство резко повышает практическое значение зональности первичных ореолов, благодаря расширению круга поисковых задач, решаемых с помощью критерия геохимической зональности.

Приведенные в табл. 20 данные выявляют поразительное сходство в рядах зональности ореолов не только однотипных, но и различных по составу и условиям формирования месторождений, что позволяет составить единый ряд основных элементов-индикаторов зональности исследованных месторождений. Как следует из табл. 20, магматические медно-никелевые и пегматитовые месторождения по характеру зональности заметно отличаются от остальных месторождений, и поэтому ряды этих месторождений при составлении обобщенного ряда не использовались. Так как в рядах зональности для отдельных элементов наблюдаются определенные отклонения, то для составления обобщенного ряда зональности определялась вероятность нахождения каждого элемента в соответствующей ячейке ряда. Эта вероятность была рассчитана на основе использования частных рядов зональности, составленных по результатам изучения первичных геохимических ореолов большого числа месторождений.

Ba	Sb	As	Hg	Cd	Ag	Pb	Zn	Au	Cu	Bi
(93)	(100)	(87)	(100)		(80)	(84)	(87)	(84)	(86)	(72)
Ni	Co	Mo	U	Sn	Be	W				
(50)	(55)	(48)	(100)	(66)	(60)	(72)				

Цифры под элементами в скобках — вероятность нахождения элемента в данной ячейке (в %). Как видно из приведенного обобщенного ряда, некоторые элементы обладают сравнительно низкой вероятностью, обусловленной их перемещением в рядах

зональности отдельных месторождений. Однако подобные перемещения не существенны: в большинстве случаев на одну и крайне редко на две и более ячейки. Низкой вероятностью в основном обладают элементы-примеси, образующие на большинстве исследованных месторождений незначительные по размерам и интенсивности ореолы (никель, кобальт, молибден и др.). Это позволяет считать, что низкая вероятность в определенной степени является следствием влияния таких помех, как флуктуация фоновых содержаний элементов, усиливающаяся при их перераспределении, относительно невысокая точность анализа и другие, поскольку слабоконтрастные ореолы более чувствительны к влиянию этих помех.

При сравнении рядов табл. 20 отмечается необычное расположение меди в ряде элементов-индикаторов зональности ореолов месторождения Сумсар. На этом месторождении, в отличие от остальных, ореол меди занимает более высокие уровни — выше свинца и серебра. Исследования показали, что в рудах и ореолах месторождения Сумсар медь в основном содержится в блеклых рудах. На месторождениях, где медь преимущественно представлена халькопиритом, в ряду зональности она расположена значительно правее (после цинка). На месторождении Терексай медь тоже входит в основном в состав блеклых руд и образует надрудные ореолы, в соответствии с чем находится в левой части ряда элементов-индикаторов зональности — левее серебра.

Эти данные свидетельствуют о существовании в первичных ореолах минеральной зональности, обусловленной сменой в пространстве различных минералов-носителей одних и тех же элементов. Именно проявлением минеральной зональности следует объяснить также своеобразное поведение мышьяка на высокотемпературном золоторудном и жильном полиметаллическом месторождениях, где интенсивные ореолы этого элемента выявлены как в верхних частях рудной зоны, так и на глубоких горизонтах — на уровне выклинивания рудных тел. В соответствии с этим в рядах этих месторождений мышьяк приведен дважды. Такое двойственное поведение мышьяка в ореолах следует объяснить появлением с глубиной арсенопирита, тогда как на верхних горизонтах мышьяк, по-видимому, входит в блеклую руду, а также в галенит и сфалерит (содержание мышьяка в этих минералах достигает сотых и десятых долей процента). Справедливость этого положения подтверждается результатами изучения ореолов месторождения Сумсар, где отсутствует арсенопирит и широко развита мышьяксодержащая блеклая руда (теннантит), на месторождении интенсивные и широкие ореолы мышьяка установлены только в верхних (надрудных) частях рудных зон.

Сравнение рядов различных месторождений позволяет обнаружить существенные отклонения еще для одного элемента — вольфрама. В рядах грейзеновых и кварц-гюбнеритовых месторождений вольфрам занимает положение намного левее (по

сравнению с остальными рядами, где вольфрам постоянно занимает последнее место). Причина такого отклонения, как выяснилось, также в существовании минеральной зональности: последним в ряду является вольфрам шеелита. Там, где вольфрам содержится в другой минеральной форме (вольфрамит, гюбнерит), он в ряду занимает места существенно левее. Эти данные показывают, что приведенный выше обобщенный ряд элементов-индикаторов зональности справедлив только для месторождений, где формы нахождения этих элементов постоянны или же представлены минералами с одинаковым распределением в пространстве. В тех случаях, когда существенно развиты минеральные формы, распределение которых в ореолах различно, один и тот же элемент в ряду зональности может занимать различные места, как это было показано для меди, мышьяка и вольфрама.

Очевидно, что не во всех случаях присутствие в ореолах различных минеральных форм того или иного элемента приведет к существенным перемещениям его в ряду зональности. Последнее будет отмечаться только при условии близких количеств минеральных форм, распределение которых отличается резкой дифференциацией в пространстве. Так, например, как в рудах, так и ореолах многих исследованных месторождений наряду с галенитом установлены случаи вхождения свинца и в другие минералы, в частности, различные сульфосоли. Однако содержание этих минералов по сравнению с галенитом оказалось ничтожным и поэтому они в ряду не смогли себя проявить и как следствие для свинца перемещений в рядах не было установлено. Вот почему при изучении зональности ореолов и составлении на этой основе соответствующих рядов необходим учет не столько качественной, сколько количественной стороны минеральной зональности.

С учетом отмеченной минеральной зональности обобщенный ряд зональности элементов-индикаторов примет следующий вид:

Ba — Sb — As¹ — Hg — Cu¹ — Cd — Ag — Pb — Zn — Au —
— Cu² — W¹ — Bi — Ni — Co — Mo — U — Sn — As² — Be — W².

Естественно, что случаи дифференциации элементов в пространстве по формам их нахождения не исчерпываются рассмотренными выше примерами. Безусловно, дальнейшие исследования позволят выявить новые особенности минеральной зональности и на этой основе уточнить и расширить обобщенный ряд зональности элементов.

Независимо от геологической обстановки, зональность ореолов повторяет зональность самих рудных тел. Примером этого могут служить широко известные случаи смены с глубиной свинцовых руд собственно цинковыми на полиметаллических месторождениях. И в первичных ореолах не только свинцово-цинковых, но и других по составу гидротермальных месторождений постоянно наблюдается уменьшение с глубиной свинцово-цинкового

отношения. Однако зональность геохимических ореолов по сравнению с рудными телами более универсальна и контрастна. Причина здесь, по-видимому, в том, что околорудное пространство, более значительное по размерам, характеризуется более однородным по сравнению с рудными телами строением и соответственно более стандартными условиями минералообразования, тогда как рудные тела представляют собой своеобразные аномалии — участки резкой смены геологоструктурных и физико-химических условий рудоотложения и отличаются ураганно-высокими содержаниями рудных компонентов и, что особенно важно, значительной дисперсией как концентраций рудных компонентов, так и других параметров. Это существенно затрудняет выявление возможной зональности рудных тел. Кроме того, в первичных ореолах, как правило, изучается распределение широкого круга химических элементов: не только основных компонентов руд, но и элементов-примесей, многие из которых образуют контрастную вертикальную зональность, тогда как зональность руд обычно рассматривается для небольшого числа основных компонентов, как правило, характеризующихся близким распределением в пространстве.

Приведенный выше обобщенный ряд зональности элементов-индикаторов составлен эмпирически — путем обобщения результатов изучения первичных ореолов большого числа различных по составу и условиям формирования гидротермальных месторождений. При изучении первичных ореолов для ускорения широкого внедрения методики первичных ореолов в практику геологоразведочных работ в основном применялся экспрессный эмиссионный спектральный анализ и поэтому в приведенном выше ряду в основном числятся элементы, первичные ореолы которых удовлетворительно выявляются с помощью указанного метода. Такой подход позволил составить годные для практического использования ряды зональности элементов-индикаторов, но с другой стороны, оставил «за бортом» многие элементы, индикаторное значение которых изучено явно недостаточно. В связи с отмеченным весьма важно изучение особенностей состава и строения первичных ореолов новых для геохимических поисков элементов (селен, теллур, таллий, тантал, редкие земли и др.) с целью расширения рядов зональности и выбора для практических целей наиболее эффективных индикаторов.

Вокруг вопроса о существовании единой геохимической зональности в первичных ореолах гидротермальных месторождений разгорелась оживленная дискуссия. Наиболее остро эта проблема обсуждалась на Второй тематической сессии Междугосударственного совета АН СССР и Министерства геологии СССР по проблеме «Научные основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых» (Иркутск, 1970).

Не рассматривая в деталях различные аспекты этой дискуссии, отметим, что часто эта зональность отождествляется с зональностью В. Эммонса. Несмотря на очевидные черты сходства,

геохимическая зональность первичных ореолов принципиально отличается от описанной В. Эммонсом зональности в размещении рудных месторождений. Геохимическая зональность первичных ореолов отражает закономерную смену в пространстве в определенном направлении (вектор движения рудоносных растворов) полей аномальных концентраций химических элементов. В отличие от этого, В. Эммонс рассматривал зональность в размещении месторождений руд различных металлов. Однако нельзя не заметить, что если эммонсовский ряд металлов рассмотреть как ряд последовательной смены в пространстве не месторождений и руд металлов, а их геохимических аномалий (ореолов), то получим ряд, практически идентичный ряду геохимической зональности первичных ореолов. Другими словами: геохимическая сторона эммонсовского ряда является более понятной, т. е. этот ряд геохимически более обоснован и именно поэтому вряд ли следует считать случайным признание этого ряда со стороны А. Е. Ферсмана, который как бы предвидел существование единой геохимической зональности в пространственном распределении типоморфных элементов-индикаторов рудных месторождений. Как показывают результаты детального изучения первичных ореолов большого числа рудных месторождений, в направлении движения рудоносных растворов происходит дифференциация элементов, что выражается в закономерной смене в направлении движения рудоносных растворов ореолов одних элементов другими. При этом содержания элементов в их ореолах низкие (окололарковые) и поэтому промышленной ценности обычно не представляют. Опыт показывает, что из множества элементов, образующих первичные ореолы, высокие концентрации (в эпицентрах ореолов), достигающие промышленных, образует крайне ограниченное число элементов, обычно один (основной промышленно ценный компонент данного месторождения) и гораздо реже — несколько. В тех случаях, когда дифференциация химических элементов приводит к формированию промышленных концентраций (руд) нескольких элементов, мы обычно имеем дело с комплексными рудами, когда в одних и тех же рудных телах устанавливаются промышленные концентрации ряда элементов. Подобные случаи наблюдаются в тех случаях, когда высокая степень дифференциации реализуется для элементов, близко расположенных в ряду зональности. Ярким примером подобной дифференциации могут служить свинцово-цинковые месторождения, в рудных телах которых в промышленных концентрациях содержатся как свинец, так и цинк, стоящие рядом в ряду зональности.

Гораздо реже встречаются случаи, когда в пределах одной рудоносной зоны наблюдается высокая степень концентрации (до промышленной значимости) для двух или более элементов, значительно удаленных в ряду зональности. В подобных случаях формируются различные по составу руды, расположенные в пространстве зонально, в соответствии с рядом зональности. Оче-

видно, что ряд зональности металлов по В. Эммонсу полностью может быть проявлен только при условии реализации высокой (промышленной) степени дифференциации для всех перечисленных в ряду металлов. Возможность этого теоретически не исключается, однако практически реализация промышленной дифференциации наблюдается только для крайне ограниченного числа элементов, и то обычно для элементов, близко расположенных в ряду зональности. Вот почему ряд зональности В. Эммонса, как справедливо указывал С. С. Смирнов [77], в природе не встречается. В отличие от этого, геохимическая зональность с различной степенью контрастности проявляется более широко практически на каждом месторождении.

Для иллюстрации более стабильного характера геохимической зональности (по сравнению с рудной) ниже рассматриваются некоторые особенности полиметаллических месторождений Центрального Карамазара (Таджикская ССР). В этом районе широко развиты свинцово-серебряные и медно-висмутовые руды. В размещении руд обычно устанавливается отчетливая вертикальная зональность, обусловленная сменой с глубиной свинцово-серебряных руд медно-висмутовыми. Наряду с этим, в районе известны также случаи изолированной локализации рудных тел свинцово-серебряного и медно-висмутового составов. На рис. 67 в разрезе схематично изображены три случая встречающейся в рудном районе локализации промышленного оруденения: I — присутствуют рудные тела обоих типов оруденения; II — рудное тело только свинцово-серебряного состава; III — рудное тело только медно-висмутового состава.

Детальное изучение первичных ореолов позволило установить в их строении отчетливую геохимическую зональность. На рис. 67 изображены аддитивные ореолы основных типоморфных для описываемых типов руд элементов-индикаторов свинца и серебра, а также меди и висмута. Как следует из рис. 67, геохимическая зональность первичных ореолов отражает рудную зональность: с глубиной параллельно со сменой типов руд происходит выклинивание ореолов свинца и серебра при одновременном расширении и усилении ореолов меди и висмута. Аналогичная геохимическая зональность устанавливается и при отсутствии рудной зональности, т. е. на месторождениях, представленных одним типом руд. При этом отсутствующие рудные тела (см. рис. 67, II, III) фиксируются полями повышенных концентраций типоморфных элементов, отчетливо отражая геохимическую дифференциацию, по каким-либо причинам достигшую степени рудной (промышленной) дифференциации. Эти поля повышенных концентраций типоморфных элементов как бы представляют собой не дошедшие до кондиций рудные тела. Приведенный пример показывает более универсальный характер геохимической зональности по сравнению с рудной.

Естественно, было бы ошибкой утверждать, что геохимическая зональность первичных ореолов строго универсальна и в природе

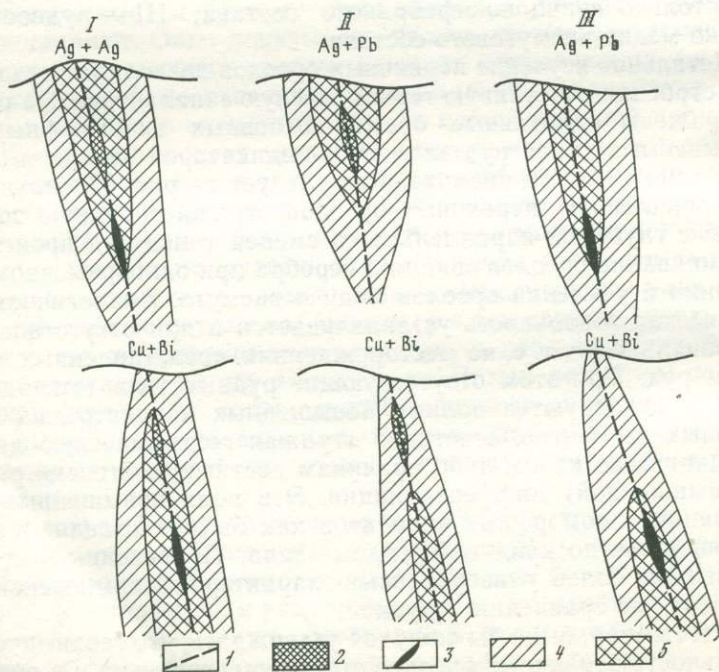
не могут быть встречены отклонения от нее. Подобные нарушения, безусловно, существуют, и речь может только идти о необходимости тщательного изучения причин подобных нарушений с целью уточнения характера и рядов зональности и обеспечения на этой основе более эффективного использования критерия зональности при решении как практических задач, так и некоторых вопросов генезиса рудных месторождений. Анализ известных примеров нарушения геохимической зональности первичных ореолов гидротермального оруденения позволяет выделить две основные причины:

1. Кулисное расположение рудных тел, когда наложение ореолов сближенных рудных тел нарушает зональность. Отметим, что анализ причин подобного нарушения единой зональности во многих случаях позволил успешно прогнозировать наличие на глубине неизвестных рудных тел. В данном случае нарушение зональности кажущееся.

2. Нарушение геохимической зональности первичных ореолов происходит также в случае образования так называемых полиформационных ореолов, когда происходит совмещение в прост-

Рис. 67. Аддитивные ореолы в разрезе

1 — рудовмещающая структура; 2 — рудное тело свинцово-серебряного состава; 3 — рудное тело медно-висмутного состава; 4, 5 — аддитивные ореолы (5 — поля повышенных содержаний)



ранстве ореолов различных по времени формирования месторождений. И в этом случае нарушение зональности кажущееся, ибо в строении первичных ореолов каждого из совмещенных в пространные типы оруденения, как будет показано ниже, выявляется нормальная зональность.

Выше при описании методики изучения зональности первичных ореолов отмечалось, что зональность в строении суммарных и, в частности, мультипликативных ореолов по сравнению с моноэлементными более контрастна. Исследования показывают, что зональность суммарных ореолов не только более контрастна, но и более стабильна. Для иллюстрации этого положения обратимся к рис. 68, на котором приведены графики изменения с глубиной отношения линейных продуктивностей частных мультипликативных ореолов скарново-полиметаллических месторождений Гарпенберг (Швеция), Алтынтопкан, Курусай, Акташ, Кансай, прожилково-вкрапленного полиметаллического месторождения Восточный Канимансур (Средняя Азия) и жильного свинцово-цинкового месторождения Садон (Северный Кавказ). Графики построены по опорным (наиболее представительным) разрезам через рудные тела указанных месторождений. При построении графиков не во всех случаях удалось достаточно полно проследить надрудные и подрудные ореолы, поэтому графики наиболее представительны для ореолов, развитых на уровне рудных тел (от верхнерудных сечений к нижнерудным). Графики построены для мультипликативного коэффициента геохимической зональности следующего вида: $Ag \cdot Pb \cdot Zn / Cu \cdot Bi \cdot Co$. Группы надрудных и подрудных элементов, естественно, выбраны с учетом рядов зональности первичных ореолов полиметаллических месторождений, а выбор этих шести элементов в значительной степени определялся имеющимися данными: эти элементы оказались сквозными для всех перечисленных месторождений. Однако нельзя утверждать, что этими элементами исчерпываются эффективные элементы-индикаторы полиметаллического оруденения. Дело в том, что использованные для построения совмещенных графиков коэффициента геохимической зональности месторождения исследовались в разные годы и на различный набор химических элементов, поэтому выбранный коэффициент, возможно, и не оптимален, поскольку он выбран из ограниченного круга элементов — тех, на которые все месторождения были исследованы.

Как следует из рис. 68, графики всех месторождений тесно совмещены: они практически повторяют друг друга и характеризуются значительным градиентом по вертикали (индикаторное отношение с глубиной меняется в десятки тысяч раз). Такой характер графиков показывает, что в строении суммарных ореолов месторождений одной или близких по составу рудных формаций (в данном случае полиметаллических месторождений) устанавливается зональность, единая не только качественно (единые ряды зональности), но количественно, когда адекватные

сечения ореолов различных месторождений одной рудной формации характеризуются весьма близкими значениями оценки зональности ореолов: в данном случае в качестве такой оценки использовано отношение линейных продуктивностей частных мультипликативных ореолов полиметаллических месторождений. Большое практическое значение этой особенности суммарных ореолов станет очевидным, если учесть, что существование ко-

Рис. 68. Совмещенные графики изменения с глубиной мультипликативного коэффициента зональности первичных ореолов полиметаллических месторождений: Ag·Pb·Zn/Cu·Bi·Co

1 — Гарпенберг; 2 — Алтын-Топкан; 3 — Курусай; 4 — Канимансур; 5 — Кансай;
6 — Акташ; 7 — Садон

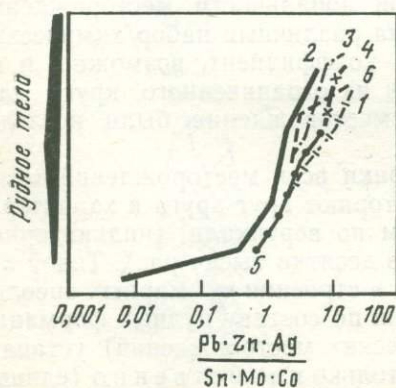
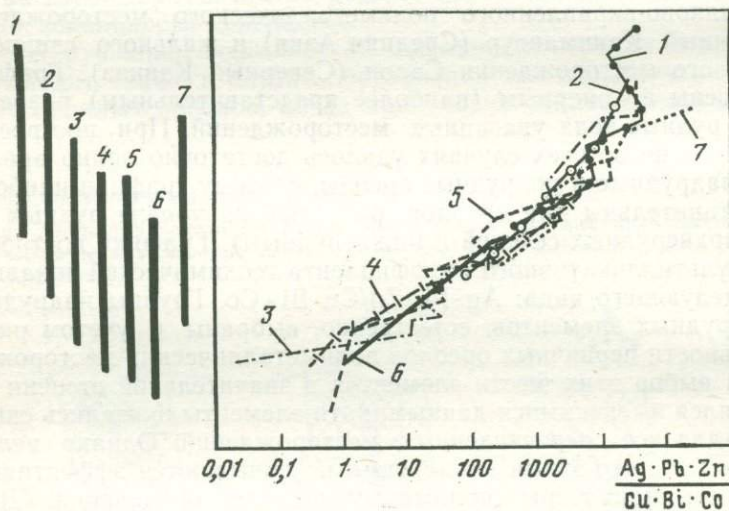


Рис. 69. Совмещенные графики изменения с глубиной мультипликативного коэффициента зональности первичных ореолов оловорудных месторождений Якутии (по Л. Н. Бельчанской)

1 — Улахан-Эгелях, разрез XIII;
2 — Эге-Хая;
3 — Депутатское, разрез IX;
4 — Депутатское, разрез XII;
5 — Улахан Эгелях, разрез XII;
6 — Улахан-Эгелях, разрез XXI

личественно единой зональности ореолов предоставляет возможность оценки с помощью этой зональности уровня выявленных аномалий относительно оруденения как в пределах известных месторождений и рудных полей, так и далеко за их пределами — на новых площадях, где эталонные месторождения отсутствуют. В связи с отмеченным становится очевидной актуальность дальнейшего всестороннего изучения зональности суммарных ореолов с целью построения подобных графиков для других рудных формаций и получения таким образом табулированных для разных уровней ореолов значений индикаторных отношений, используемых в качестве оценок зональности первичных ореолов.

Совмещенные графики изменения с глубиной линейных продуктивностей частных мультипликативных ореолов были составлены также по результатам изучения ряда оловорудных месторождений Якутии, Приморья и Дальнего Востока (рис. 69—71). Во всех случаях в строении мультипликативных ореолов оловорудных месторождений устанавливается количественно единая зональность: сближенные графики различных месторождений характеризуются значительным градиентом по вертикали (несколько порядков), что позволяет надежно дифференцировать различные уровни рудных тел и окаймляющих их первичных ореолов по величине оценки зональности ореолов, в качестве которой используется отношение линейных продуктивностей ореолов.

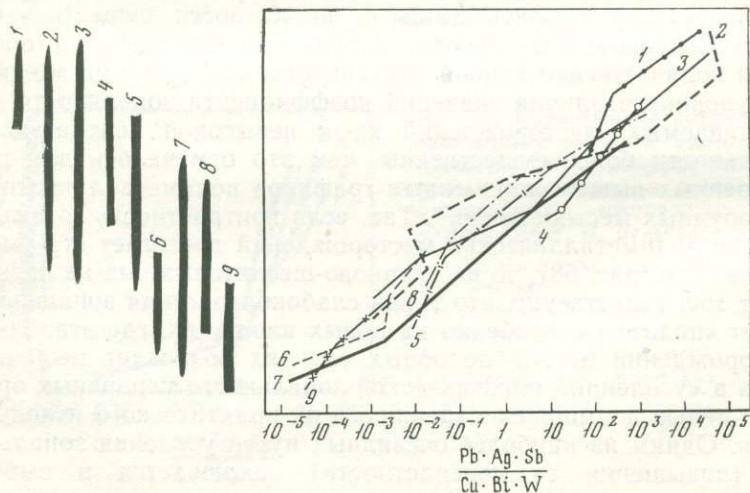
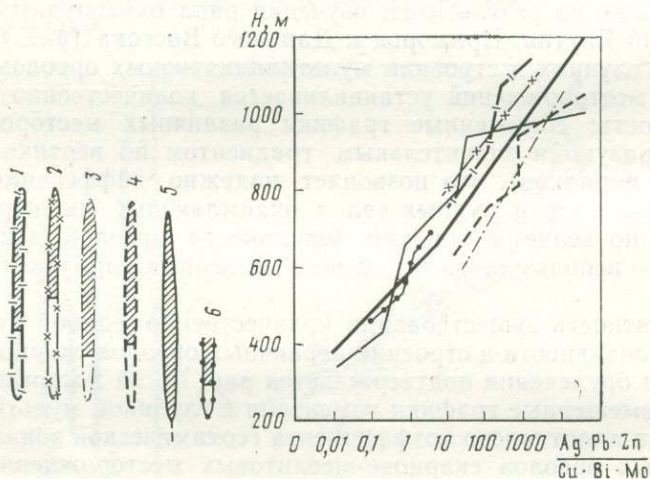
Вероятность существования количественно единой геохимической зональности в строении первичных ореолов скарново-шеелитового оруденения подтверждается рис. 72, на котором приведены совмещенные графики изменения с глубиной мультипликативного и аддитивного коэффициента геохимической зональности первичных ореолов скарново-шеелитовых месторождений Тырнауз (Северный Кавказ) и Восток-2 (Приморье). В данном случае можно говорить лишь о возможности существования в строении первичных ореолов скарново-шеелитовых месторождений количественно единой зональности, поскольку на адекватных уровнях различия значений коэффициента зональности для сравниваемых месторождений из-за невысокой контрастности зональности более существенны, чем это отмечалось для рассмотренных выше совмещенных графиков полиметаллических и оловорудных месторождений. Так, если контрастность зональности для полиметаллических месторождений достигает ста тысяч и более (см. рис. 68), то на скарново-шеелитовых она не превосходит 150. Естественно, что такая слабоконтрастная зональность может «подвести», особенно на новых площадях, где эталонных месторождений нет. В подобных случаях возникает необходимость в «усилении» геохимической зональности первичных ореолов с целью повышения надежности их практического использования. Одним из наиболее очевидных путей усиления зональности (повышения ее контрастности) заключается в выборе в качестве оценки зональности мультипликативных коэффициен-

Рис. 70. Совмещенные графики изменения с глубиной величины мультипликативного коэффициента зональности первичных ореолов оловорудных месторождений Приморья (по Э. С. Кравченко)

1 — Верхнее; 2 — Верхне-Кенцухинское; 3 — Хрустальное; 4 — Арсеньевское; 5 — Комсомольское; 6 — Перевальное. Жирной сплошной линией изображен усредненный график изменения величины коэффициента

Рис. 71. Совмещенные графики изменения с глубиной величины мультипликативного коэффициента зональности первичных ореолов оловорудных месторождений Дальнего Востока (по А. Ф. Миронюку)

1 — Южное; 2 — Смирновское; 3 — Зимнее; 4 — Верное; 5 — Ветвистое; 6 — Ивановское; 7 — Дальнетаежное; 8 — Трудное; 9 — Обычное



тов более высоких порядков. Этот способ, однако, не всегда осуществим по причине ограниченного круга элементов-индикаторов. Именно такой случай характерен для месторождения Тырнауз, где из-за совмещения в пространстве двух типов оруденения (скарново-шеелитового и кварц-молибденитового) и образования полиформационных ореолов большинство элементов оказались сквозными для обоих типов оруденения и поэтому число специфических только для скарново-шеелитового оруденения оказалось крайне ограниченным. В аналогичных случаях, а также в ряде других с успехом может быть использован метод анализа тяжелых фракций геохимических проб.

Установлено, что по результатам анализа тяжелых фракций геохимических проб удастся выявить ореолы, отличающиеся как более значительными размерами и интенсивностью, так и существенно более высококонтрастной зональностью [31]. Для иллюстрации этого положения на рис. 73 приведены графики изменения с глубиной мультипликативного коэффициента геохимиче-

Рис. 72. Совмещенные графики изменения величин аддитивных и мультипликативных коэффициентов зональности первичных ореолов скарново-шеелитового оруденения

- 1 — рудные тела.
 Месторождение Тырнауз (I):
 2 — аддитивный коэффициент $(\text{Be} + \text{Sn})/(\text{W} + \text{Bi})$,
 3 — мультипликативный коэффициент $(\text{Be} \cdot \text{Sn})/(\text{W} \cdot \text{Bi})$; месторождение Восток-2,
 4 — аддитивный коэффициент,
 5 — мультипликативный коэффициент

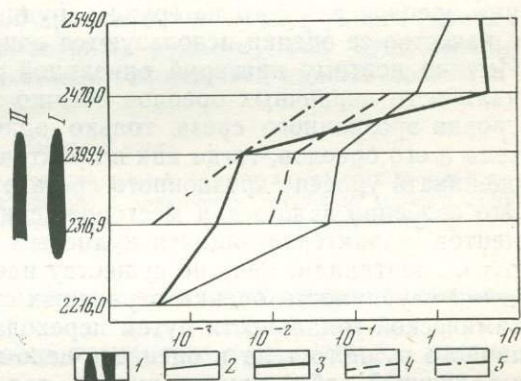
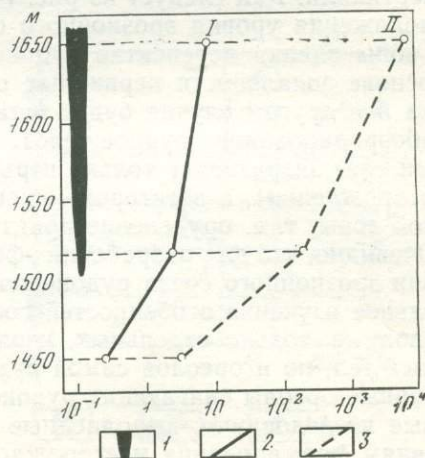


Рис. 73. Графики изменения с глубиной величин мультипликативных коэффициентов зональности первичных ореолов

- 1 — рудная зона;
 2, 3 — графики мультипликативного коэффициента $(\text{Ag} \cdot \text{Pb} \cdot \text{Zn})/(\text{Co} \cdot \text{Mo} \cdot \text{W})$, рассчитанного по валовым анализам (I) и результатам анализа тяжелых фракций (II)



ской зональности полиметаллического месторождения Мироновское (Киргизская ССР), первичные ореолы которого изучены С. В. Григоряном и Г. Г. Гулиевым. Как следует из рис. 73, зональности ореолов, выявленные по результатам анализа тяжелых фракций геохимических проб, почти на два порядка контрастнее (в сравнении с результатами анализа валовых проб). Этот пример свидетельствует о больших перспективах применения различных модификаций метода тяжелых фракций (в зависимости от типа месторождений) при изучении геохимической зональности первичных ореолов и рудных тел различных по составу и условиям формирования месторождений.

Как известно, одним из важнейших аспектов практического использования первичных ореолов является оценка уровня эрозионного среза геохимических аномалий на основе геохимической зональности первичных ореолов. В настоящее время, как известно, наиболее детально изучены первичные ореолы рудных тел. При этом установлено, что зональность первичных ореолов рудных тел одного месторождения идентична и повторяется в строении ореолов каждого из группы рудных тел месторождения и в качестве ее оценки используются одни и те же коэффициенты. Именно поэтому критерий описанной выше геохимической зональности первичных ореолов обычно используется для оценки уровня эрозионного среза только одного конкретного рудного тела и его ореолов, тогда как в практическом отношении важнее оценивать уровень эрозионного среза рудоносной зоны в целом. Это особенно важно для месторождений цветных и редких элементов, характеризующихся кулисным расположением рудных тел по вертикали. Речь по существу идет о значительном увеличении глубинности оценки первичных ореолов на основе их геохимической зональности путем перехода от оценки ореолов единичного рудного тела к оценке в целом рудоносной зоны, представляющей собой группу рудных тел, сменяющих друг друга по вертикали. Как следует из рис. 74, для двух крайних случаев расположения уровня эрозионного среза относительно рудоносной зоны оценка перспектив рудоносности участка на глубину на основе зональности первичных ореолов будет одинаковой и в том и в другом случае будет установлен верхнерудный срез (слабоэродированное рудное тело), хотя в первом случае эрозионный срез затрагивает только верхнюю часть рудоносной зоны (месторождения), а во втором — вскрыты корневые части рудоносной зоны, т. е. оруденение практически уничтожено эрозией.

Очевидно, что для разработки эффективных критериев оценки уровня эрозионного среза рудоносной зоны в целом необходимо детальное изучение особенностей состава и строения первичных ореолов не только отдельных, изолированных в пространстве рудных тел, но и ореолов самой рудоносной зоны, включающей первичные ореолы слагающих рудоносную зону рудных тел. Подобные исследования, выполненные на различных по составу и условиям формирования месторождениях, позволили установить

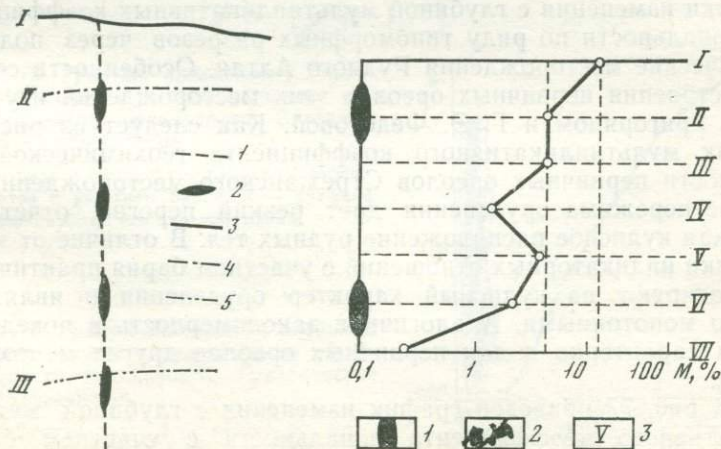
определенные различия в строении первичных ореолов отдельных рудных тел и рудоносных зон в целом. Эти геохимические различия могут быть использованы для выбора надежных коэффициентов зональности для оценки уровня эрозионного среза рудоносных зон и на этой основе увеличения глубинности прогноза по геохимической зональности. Так, для некоторых надрудных элементов выявлена определенная связь между интенсивностью их надрудных ореолов и гипсометрическим положением соответствующего рудного тела в пределах рудоносной зоны: чем выше рудное тело, тем интенсивнее их надрудные ореолы и, наоборот (при прочих равных условиях). Для иллюстрации этого положения на рис. 75 приведен график изменения с глубиной линейной продуктивности первичного ореола свинца — характерного индикатора надрудных элементов, залегающего в гранитах гидротермального уранового месторождения [30], которое в исследованном разрезе представлено двумя слепыми рудными телами, расположенными одно над другим. Как следует из рис. 75, надрудная часть каждого из рудных тел характеризуется отчетливым максимумом линейной продуктивности ореола свинца (горизонты I и V). При этом продуктивность надрудного ореола верхнего (меньшего по размерам) рудного тела существенно больше (по сравнению с нижним телом). Эти данные показыва-

Рис. 74. Схематический разрез рудоносной зоны

1 — рудовмещающая структура; 2 — рудные тела; 3 — линия поверхности во время локализации оруденения; 4 — линия эрозионной поверхности, вскрывшей верхнюю часть рудоносной зоны; 5 — линия эрозионной поверхности, вскрывшей нижнюю часть рудоносной зоны

Рис. 75. График изменения с глубиной линейной продуктивности первичного ореола свинца

1 — рудное тело; 2 — график линейной продуктивности ореола свинца; 3 — номер горизонта опробования



ют, что зональность первичных ореолов каждого из рудных тел развивается на фоне геохимической зональности рудоносной зоны, которая в данном случае может быть использована для оценки уровня эрозионного среза рудоносной зоны в целом. Существование зональности двух порядков (рудных тел и рудоносной зоны в целом) отчетливо отражено на рис. 75; общая тенденция монотонного уменьшения продуктивности ореола свинца с глубиной нарушается резким перегибом над нижним рудным телом, что фиксирует проявление локальной зональности первичных ореолов конкретного рудного тела.

Естественно, что наиболее эффективными индикаторами оценки уровня эрозионного среза рудоносных зон будут элементы, в строении ореолов которых проявляется только геохимическая зональность рудоносных зон (зональность первого порядка), ибо проявление более локальной зональности (второго порядка) затрудняет практическое использование критерия зональности из-за нарушения монотонного характера изменения с глубиной параметров ореолов. Таким элементом, как показали исследования, является барий — один из важнейших элементов-индикаторов зональности первичных ореолов различных типов эндогенных рудных месторождений. Барий проявляет отчетливую тенденцию преимущественного накопления в верхних частях рудоносных зон, в отличие от остальных надрудных элементов (сурьма, серебро, и др.), которые образуют отчетливые «шапки» над каждым рудным телом и не проявляют отчетливо выраженной зональности первого порядка. Благодаря этому изменение с глубиной коэффициентов зональности, использующих барий (в сочетании с другими элементами), более монотонное (однонаправленное). Исключение бария из коэффициента приводит к возникновению резких перегибов в графиках коэффициента зональности, фиксирующих зональность первичных ореолов каждого из группы рудных тел.

Для иллюстрации этого положения на рис. 76, 77 приведены графики изменения с глубиной мультипликативных коэффициентов зональности по ряду типоморфных разрезов через полиметаллические месторождения Рудного Алтая. Особенности состава и строения первичных ореолов этих месторождений изучены С. В. Григоряном и Г. Э. Федотовой. Как следует из рис. 76, график мультипликативного коэффициента геохимической зональности первичных ореолов Стрежанского месторождения на уровне пережима оруденения дает резкий перегиб, отчетливо отражая кулисное расположение рудных тел. В отличие от этого графики индикаторных отношений с участием бария практически не реагируют на кулисный характер оруденения и являются строго монотонными. Аналогичная закономерность в поведении бария характерна и для первичных ореолов других месторождений.

На рис. 77 приведен график изменения с глубиной мультипликативного коэффициента зональности с участием бария

($Ba^2/Mo \cdot Ni$) в первичных ореолах Гусяковского месторождения. Как видно, этот график также фиксирует строго монотонное уменьшение с глубиной величины этого коэффициента несмотря на сложное кулисное строение рудоносной зоны. Отмечена исключительная высокая контрастность рассматриваемого коэффициента зональности: на глубину не более 500 м величина коэффициента монотонно уменьшается более чем в 10 млн. раз, что обеспечивает высокую надежность использования этого коэффициента для оценки уровня эрозионного среза рудоносной зоны в целом. В отличие от описанного, графики любых других вариантов коэффициента зональности без участия бария характеризуются резкими перегибами, фиксирующими появление с глубиной новых рудных кулис.

Аналогичные описанным выше особенности бария установлены на некоторых золоторудных месторождениях [34]. На рис. 78 изображены графики различных вариантов мультипликативного коэффициента зональности, иллюстрирующие геохимическую зональность в строении первичных ореолов рудоносной зоны, включающей два сменяющих друг друга с глубиной рудных тела. Описываемое месторождение расположено в Восточном Забайкалье и залегает в глубоко метаморфизованных архейских поро-

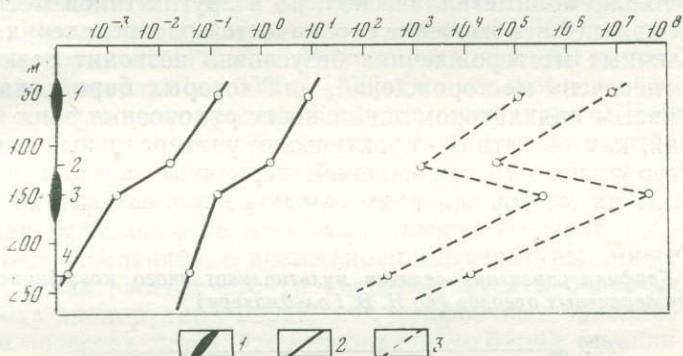
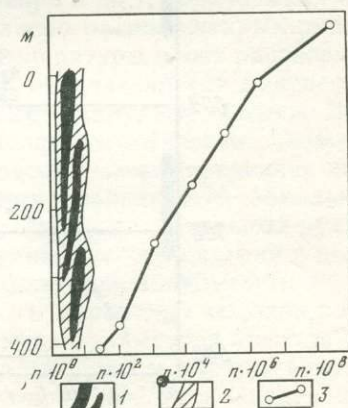


Рис. 76. Графики изменения с глубиной величин мультипликативных коэффициентов зональности. Стржанское месторождение

1 — рудное тело; 2 — графики коэффициентов с участием бария; 3 — графики коэффициентов без участия бария

Рис. 77. График изменения с глубиной величины мультипликативного коэффициента зональности. Гусяковское месторождение

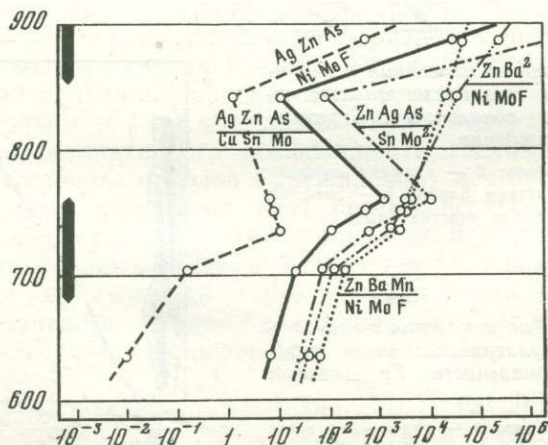
1 — рудные тела; 2 — рудоносная зона; 3 — график коэффициента $Ba^2/Mo \cdot Ni$



дах. Последние в северной части рудного поля прорваны гранитоидами позднеюрского амуджиканского комплекса. Рудные тела локализируются в протяженных зонах дробления и смятия северо-восточного и близмеридионального простирания. По вещественному составу руды месторождения относятся к золото-сульфидно-кварцевой формации. Типоморфными для руд месторождения минералами являются пирит, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит, пирротин, магнетит, гематит, марказит, теннантит, аргентит, золото, халькозин, висмутит, галеновисмутит, буланжерит, молибденит. В результате изучения первичных ореолов установлены особенности зонального строения первичных ореолов и на этой основе выбраны мультипликативные коэффициенты геохимической зональности. Как следует из рис. 78, все графики коэффициентов без участия бария образуют контрастный перегиб в пространстве между рудными телами, тем самым отчетливо фиксируя пережим оруденения и появление на глубине слепого рудного тела. В отличие от этого величины коэффициентов с участием бария с глубиной убывают монотонно, отражая геохимическую зональность в строении первичных ореолов рудоносной зоны. Этот пример показывает, что барий может оказаться эффективным индикатором зональности рудоносных зон не только полиметаллических, но и других типов месторождений и дальнейшее изучение особенностей распределения бария на различных месторождениях безусловно позволит резко расширить перечень месторождений, для которых барий окажется эффективным индикатором зональности рудоносных зон.

Барий, как известно,— практически универсальный элемент-индикатор рудных месторождений: первичные ореолы его установлены на месторождениях самых различных как по соста-

Рис. 78. Графики изменения величин мультипликативного коэффициента зональности первичных ореолов (по И. В. Гольдмахеру)



ву, так и геологическим условиям локализации оруденения. Именно поэтому установленная впервые на примере ряда полиметаллических месторождений и кратко описанная выше специфическая особенность зонального строения ореолов бария резко повышает интерес к этому элементу, как к важному индикатору зональности рудоносных зон не только полиметаллических, но и других типов месторождений. Для реализации, по всей вероятности, значительных потенциальных возможностей бария как индикатора геохимической зональности необходимо детальное изучение особенностей пространственного распределения этого элемента на различных месторождениях с целью определения методики использования бария как индикатора зональности ореолов. Приведенные выше данные о существовании в первичных ореолах зональности двух порядков расширяют возможности геохимических критериев при оценке геохимических аномалий. Методика этой оценки должна включать как оценку уровня эрозионного среза первичных ореолов ближайшего к исследованному срезу рудного тела, так и ореолов рудоносной зоны в целом (в последнем случае с помощью бария).

Описанное выше специфическое распределение бария не случайно и, возможно, определяется тем, что его единственный распространенный в рудных месторождениях и их первичных ореолах минерал представлен баритом, который обладает ретроградной растворимостью в воде. Начало ретроградной растворимости барита приходится на 250°C [105]. Это означает, что поведение бария в первичных ореолах не будет отличаться от других элементов только на месторождениях, формирование которых происходило при температурах ниже 250°C . В тех же случаях, когда месторождения формировались при более высоких температурах (к таким относится подавляющее большинство эндогенных месторождений), с понижением температуры (ниже 250°C) барит вновь растворяется и переотлагается в более холодных участках околорудных пород, т. е. в первичных ореолах. В связи с этим представляется, что первоначально барий, подобно другим надрудным элементам (сурьма, серебро и др.), образовывал надрудные ореолы над каждым из кулисно расположенных рудных тел, но потом по мере понижения температуры вновь растворялся и переотлагался в более удаленных верхних частях рудоносных зон, образуя над ними своеобразные надрудные шапки. Важность дифференциальной оценки уровня геохимических аномалий относительно рудного тела и рудоносной зоны определяет необходимость сравнительного изучения особенностей зонального строения первичных ореолов рудоносных зон и отдельных рудных тел на примере различных типов рудных месторождений с целью выявления новых эффективных индикаторов зональности.

Поперечная зональность первичных ореолов по существу отражает различия в величинах параметров ореолов различных элементов вкрест простираения рудных тел и окаймляющих их ореолов. Эта зональность определяется концентрацией

элементов в рудных телах и ореолах, подвижностью элементов, а также величинами их фоновых содержаний во вмещающих породах. В табл. 21 приведены ряды элементов, отражающие поперечную зональность первичных ореолов различных по составу месторождений. В этих рядах элементы расположены в порядке убывания линейных продуктивностей их ореолов, развитых на уровне верхних частей рудных тел и выше. При расчете продуктивностей использованы среднеаномальные содержания элементов в единицах геохимического фона. В отличие от вертикальной (осевой) зональности, единообразной для различных по составу месторождений (см. табл. 21), поперечная зональность в силу отмеченной выше зависимости от состава руд специфична для каждого из месторождений. Первыми в рядах, как правило, расположены элементы — основные промышленно-ценные компоненты руд.

Зависимость ширины ореолов от концентрации элементов в рудах позволяет использовать поперечную зональность в качестве критерия определения вероятного состава предполагаемого слепого оруденения по поперечной зональности надрудных ореолов. Следует отметить, что для этой цели могут быть также использованы ряды поперечной зональности, составленные по

Таблица 21. Поперечная зональность первичных ореолов

Месторождения	Ряды поперечной зональности
Свинцово-цинковые в скарнах Жильные свинцово-цинковые	Цинк, свинец, мышьяк, серебро, медь, сурьма Свинец, барий, цинк, серебро, медь, мышьяк, кобальт
Шеелитовые в скарнах	Вольфрам, молибден, медь, барий, цинк, свинец
Кварц-золоторудные	Золото, мышьяк, висмут, серебро, свинец, сурьма, медь, бериллий, молибден, кобальт, цинк
Медно-порфиновые	Золото, медь, молибден, серебро, мышьяк, сурьма
Медно-молибденовые	Медь, молибден, цинк, свинец, кобальт, никель, олово, бериллий, вольфрам, висмут, мышьяк, барий, серебро
Медно-висмутовые	Медь, висмут, свинец, серебро, мышьяк, барий, цинк, кобальт
Сульфидно-касситеритовые	Олово, медь, серебро, цинк, свинец, мышьяк, вольфрам
Кварц-касситеритовые	Мышьяк, вольфрам, серебро, олово, медь, цинк, свинец
Урановые Ртутные	Уран, молибден, свинец, медь, цинк, серебро Ртуть, мышьяк, барий, медь, свинец, цинк, никель, серебро, кобальт
Стратиформные свинцово-цинковые	Серебро, свинец, медь, мышьяк, барий, кобальт, цинк, никель

величинам средних содержаний, выраженных в единицах геохимического фона. Эти ряды принципиально не отличаются от рядов, приведенных в табл. 21, и используются в тех случаях, когда по каким-либо причинам размеры ореолов в поперечном направлении не установлены (ореолы полностью не оконтурены из-за ограниченной протяженности профилей опробования и т. д.).

Возможности использования поперечной зональности первичных ореолов для определения состава предполагаемого на глубине оруденения рассматриваются на примере столь близких по составу (соответственно по набору элементов-индикаторов) месторождений, какими являются месторождения кварц-касситеритовой и сульфидно-касситеритовой формаций. Сравнение приведенных в табл. 21 рядов элементов-индикаторов поперечной зональности позволяет выделить элементы, положение которых в сравниваемых рядах отличается существенно. Такими являются мышьяк и вольфрам, что позволило выбрать следующий мультипликативный показатель формационной принадлежности оловорудных аномалий — $Sn^2/As \cdot W$ (олово в квадрате для обеспечения безразмерности показателя). Используемые в показателе элементы в ряду элементов-индикаторов вертикальной геохимической зональности (см. табл. 20) стоят рядом, поэтому величина этого показателя в ореолах одной рудной формации по вертикали существенных изменений не будет претерпевать, тогда как ореолы двух сравниваемых формаций по этому показателю отличаются весьма существенно: для ореолов месторождений сульфидно-касситеритовой формации величина рассматриваемого показателя всегда больше 0,1, тогда как в ореолах месторождений кварцево-касситеритовой формации она не превышает 0,005.

Исследования показывают, что в зависимости от элементов залегания рудных тел поперечная зональность первичных ореолов может быть симметричной и асимметричной. Симметричной поперечной зональностью характеризуются первичные ореолы, развитые вокруг рудных тел вертикального падения. В тех случаях, когда рудные тела наклонные, как правило, наблюдается более интенсивное развитие первичных ореолов висячем боку рудных тел, что обуславливает асимметрию поперечной зональности (рис. 79).

Следует отметить, что избирательное накопление элементов висячем боку рудных тел особенно характерно для индикаторов надрудной группы, благодаря чему отношение содержаний надрудных и подрудных элементов позволяет выявить более отчетливую асимметрию поперечной зональности. При этом максимальный эффект достигается, если использовать отношение произведений (мультипликативный показатель) содержаний надрудных и подрудных элементов, выбор которых производится на основе рядов элементов-индикаторов зональности данного типа оруденения. Эта особенность поперечной зональности первичных

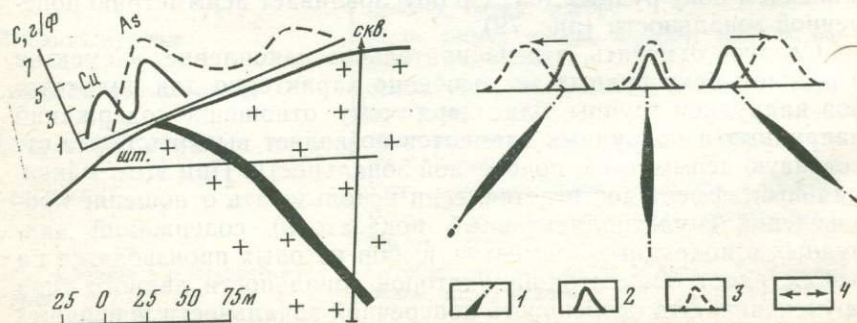
ореолов может быть использована для определения условий залегания рудных тел: отсутствие асимметрии горизонтальной зональности свидетельствует о субвертикальном залегании рудного тела, тогда как наклонное его залегание фиксируется асимметрией поперечной зональности, которая может быть использована для определения направления падения оруденения. Вряд ли нужно доказывать, что знание условий залегания рудных тел представляет собой важнейшее условие успешной разведки рудопроявлений, признанных перспективными. Естественно, что асимметрия горизонтальной зональности может быть использована для определения условий залегания только для рудных тел, залегающих в однородной среде. В тех случаях, когда рудные тела локализованы на контакте различных по составу или физико-механическим свойствам пород, асимметрия горизонтальной зональности первичных ореолов может быть обусловлена и этой причиной, что должно быть учтено при интерпретации геохимических аномалий.

Выше был рассмотрен пример асимметричной поперечной зональности первичных ореолов вскрытой эрозией золоторудной жилы. Естественно, что в условиях обнаженных районов падение выходящих на поверхность рудных тел достаточно надежно определяется при геологическом картировании и обычно не возникает необходимости в привлечении геохимических критериев. Однако в условиях закрытых районов, когда рудные тела и сопровождающие их первичные ореолы перекрыты элювиально-делювиальными отложениями, для определения падения рудных тел может оказаться достаточно эффективным использование особенностей поперечной зональности вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов (при условии их удовлетворительной

Рис. 79. Графики распределения мышьяка и меди вокруг кварц-золоторудной жилы

Рис. 80. Особенности развития первичных ореолов различных элементов-индикаторов над слепым оруденением (схема)

1 — слепое рудное тело; 2 — графики подрудных элементов-индикаторов; 3 — графики рудных элементов-индикаторов; 4 — направления склонения слепой рудной залежи



корреляции с первичными ореолами). В связи с тем, что определение условий залегания слепых рудных тел весьма сложно, интересно рассмотреть возможности привлечения для решения этой задачи поперечной зональности первичных ореолов.

Определение направления падения слепых рудных тел по характеру изменения в поперечном направлении только аддитивного (или мультипликативного) показателя не однозначно, поскольку максимальные значения (эпицентр) этого показателя могут фиксировать как слепое оруденение вертикального падения (эпицентр представляет собой вертикальную проекцию оруденения на поверхность), так и висячий бок слепого оруденения, причем и в этом случае возможны два варианта, как это схематически показано на рис. 80. Однозначное решение может быть достигнуто, если удастся на поверхности проследить рудовмещающую структуру и сопровождающие ее метасоматические изменения рудовмещающих пород. Тогда направление смещения эпицентра индикаторного отношения от рудовмещающей структуры будет соответствовать падению слепого оруденения. Но далеко не всегда удастся однозначно установить рудовмещающую структуру: часто на поверхности они проявлены слабо или же вовсе отсутствуют: известны случаи, когда слепые залежи локализируются в слепых структурах. Кроме того, во многих случаях наличие серии разрывных нарушений резко затрудняет выделение среди них рудовмещающей. В подробных случаях при установлении рудовмещающих структур и определении на этой основе вероятного направления падения предполагаемого слепого оруденения существенную помощь может оказать использование особенностей распределения элементов-индикаторов в первичных ореолах.

По результатам изучения различных месторождений установлено, что рудовмещающие структуры на поверхности фиксируются интенсивными ореолами элементов — основных компонентов руд (свинца и цинка на полиметаллических месторождениях, олово — на оловорудных и т. д.), т. е. максимумы аномалий этих элементов совпадают с рудовмещающей структурой. В случае слепых структур центры аномалий также фиксируют рудовмещающие структуры, располагаясь на их продолжении по восставанию. Это обстоятельство позволяет рекомендовать использование при определении условий залегания слепого оруденения правила двух максимумов: а) максимума аномалий элементов — основных компонентов руд; б) максимума полей аномалий, оконтуренных по величине аддитивного (или мультипликативного) показателя. При этом можно пользоваться следующим правилом: совмещение обоих максимумов и симметричное расположение кривых свидетельствует о вертикальном (субвертикальном) падении слепого оруденения; сдвиг максимумов друг относительно друга наблюдается в случае наклонного залегания рудного тела, при этом максимум аддитивного (или мультипликативного) показателя фиксирует висячий бок рудной залежи (см. рис. 80).

Заканчивая рассмотрение поперечной зональности первичных ореолов, отметим, что в ряде случаев отчетливым индикатором направления падения рудных тел служит барий, поведение которого как наиболее характерного надрудного элемента различных по составу месторождений является специфичным. Над слепым оруденением барий обычно образует своеобразную шапку повышенных содержаний: вниз по вертикали ореолы бария сужаются, интенсивность их падает. Рудные тела обычно характеризуются минимальным содержанием бария из участков рудных тел и примыкающих к ним вмещающих пород и переотложением его в надрудных и боковых частях околорудного пространства. При перераспределении барий проявляет отчетливую тенденцию избирательного накопления в всячем боку рудных тел (рис. 81), обуславливая асимметричную поперечную зональность ореолов, которая также может быть использована для определения направления падения слепой залежи.

Рассмотрим поперечную зональность первичных ореолов, выявленных вокруг слепого крутопадающего полиметаллического оруденения, залегающего на глубине 250 м (Курусайское скарново-полиметаллическое месторождение, Средняя Азия). Как следует из рис. 82, ореолы бария практически развиты только в надрудной части околорудного пространства. В отличие от ореолов элементов — основных компонентов руд (свинца, цинка, серебра), ореол бария отчетливо сдвинут в сторону всячего бока слепой залежи, несмотря на слабый наклон последней. Смещение максимумов бария относительно остальных элементов иллюстрируется кривыми распределения этих элементов, построенными по результатам опробования коренных пород на поверхности. Рис. 83 иллюстрирует избирательное накопление бария в всячем боку выходящих на поверхность рудных тел золото-полиметаллического рудопроявления Арманис (Армянская ССР).

Продольная зональность первичных ореолов выражается в закономерном изменении величин различных параметров ореолов в направлении простираения рудоносных зон, включающих как рудные тела, так и окаймляющие их первичные ореолы. Продольная зональность первичных ореолов также (аналогично поперечной зональности) может быть симметричной (отсутствует склонение рудных тел и сопровождающих ореолов) и асимметричной, когда в продольном направлении в соответствии со склонением рудных тел происходит дифференциация в распределении элементов-индикаторов. Эта зональность также отражает направление движения рудоносных растворов в плоскости рудоносных зон и поэтому согласуется с рассмотренными выше рядами элементов-индикаторов осевой зональности первичных ореолов (см. табл. 20). Для иллюстрации продольной геохимической зональности первичных ореолов ниже по данным С. В. Григоряна и А. Ф. Миронюка рассматриваются особенности зонального распределения химических элементов в ореолах месторождения Зимнего (Дальний Восток).

Рис. 81. Первичные ореолы вокруг рудных тел ртутного месторождения Сахалинского на Северном Кавказе

1 — рудовмещающие породы; 2 — рудное тело; 3, 4 — первичные ореолы (4 — поля повышенных содержаний); 5 — буровые скважины

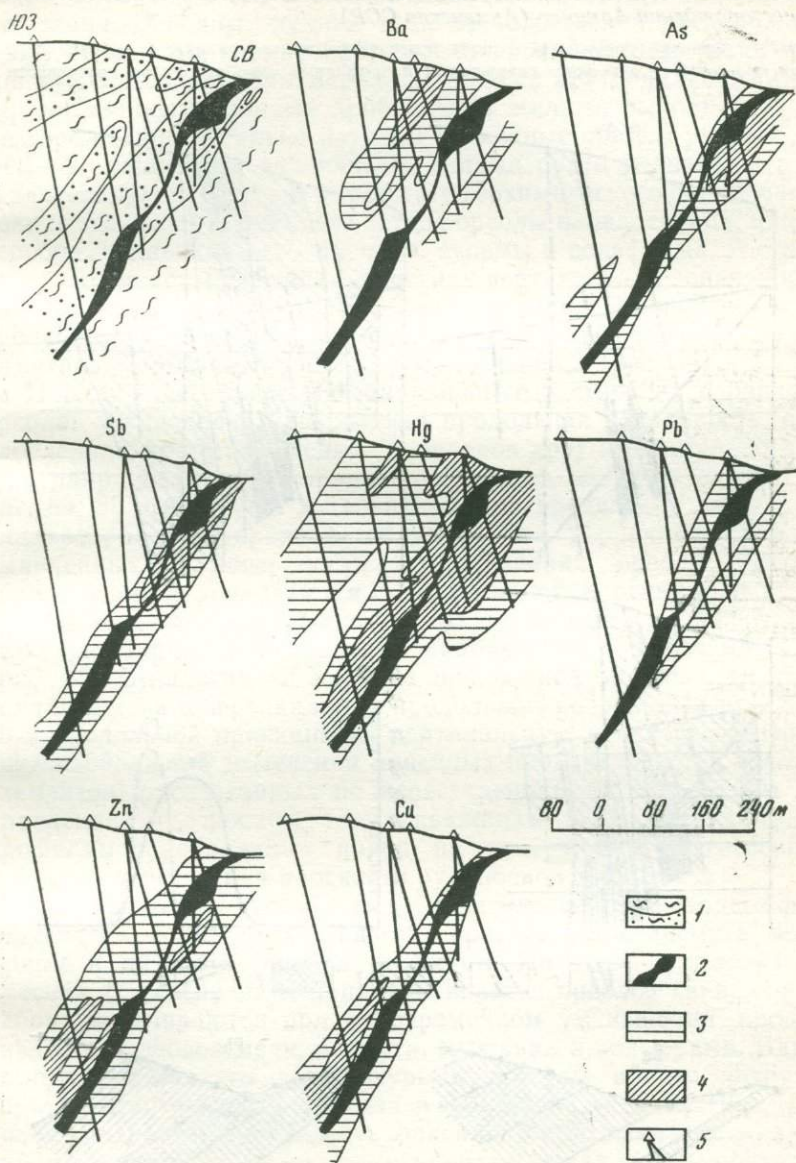
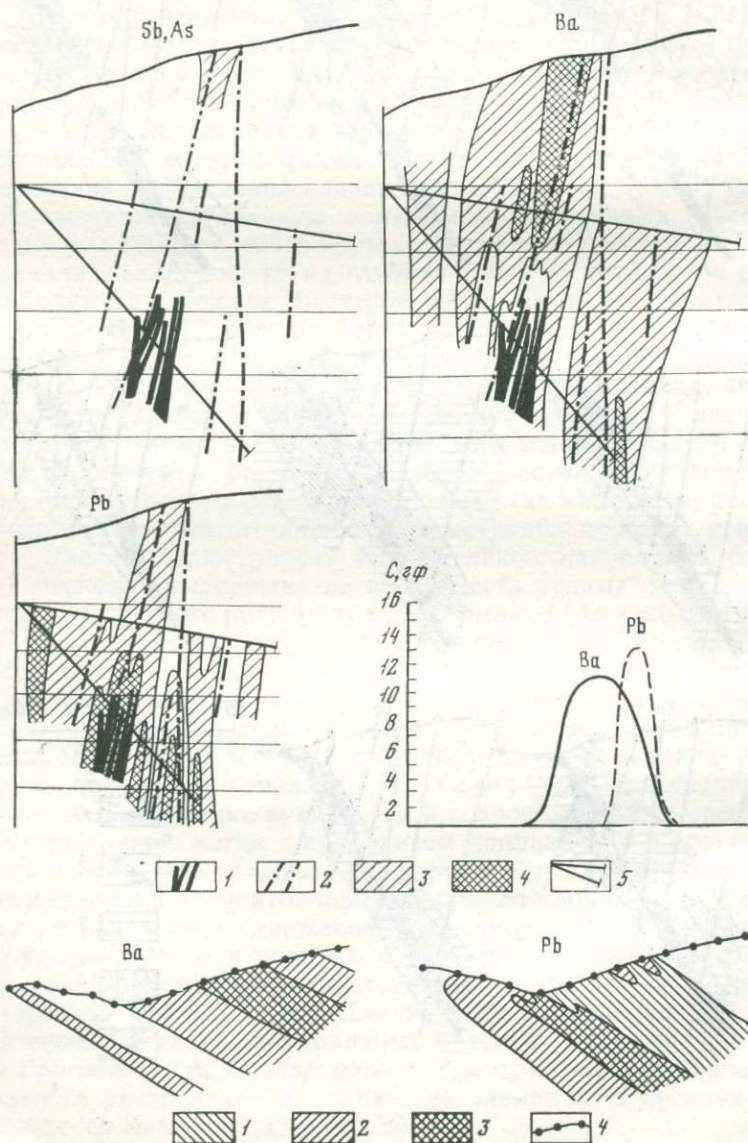


Рис. 82. Первичные ореолы вокруг рудных тел месторождения Северный Курсай II

1 — рудные тела; 2 — разрывные нарушения; 3, 4 — первичные ореолы элементов (4 — поля повышенных концентраций); 5 — опробованные сечения

Рис. 83. Асимметричные распределения бария и свинца в продольном разрезе на месторождении Арманис (Армянская ССР)

1, 2, 3 — первичные ореолы (3 — поля повышенных концентраций); 4 — точки пересечения плоскости рудной зоны скважинами и профилями опробования на поверхности



Рудное поле описываемого месторождения сложено юрскими и меловыми песчаниками, алевролитами и глинистыми сланцами, смятыми в крутые складки северо-восточного простирания. Осадочные породы прорваны небольшой гранитоидной интрузией, вокруг которой развит ореол интенсивного ороговикования и биотитизации. Основные рудные тела месторождения расположены к югу от массива гранитоидов, имеют протяженность сотни метров и представлены близмеридиональными крутопадающими минерализованными зонами дробления и жилами выполнения. На месторождении детально изучены первичные ореолы рудных зон № 1—4, сложенных различными типами руд и разведанных на значительную глубину. В результате геохимического опробования вокруг всех зон установлены четкие ореолы олова, свинца, цинка, серебра, мышьяка, меди, висмута, сурьмы и вольфрама. В строении ореолов установлена контрастная вертикальная зональность, которая выражается в увеличении с глубиной продуктивностей ореолов меди, висмута и вольфрама при уменьшении этих же параметров в ореолах сурьмы, серебра и свинца (рис. 84).

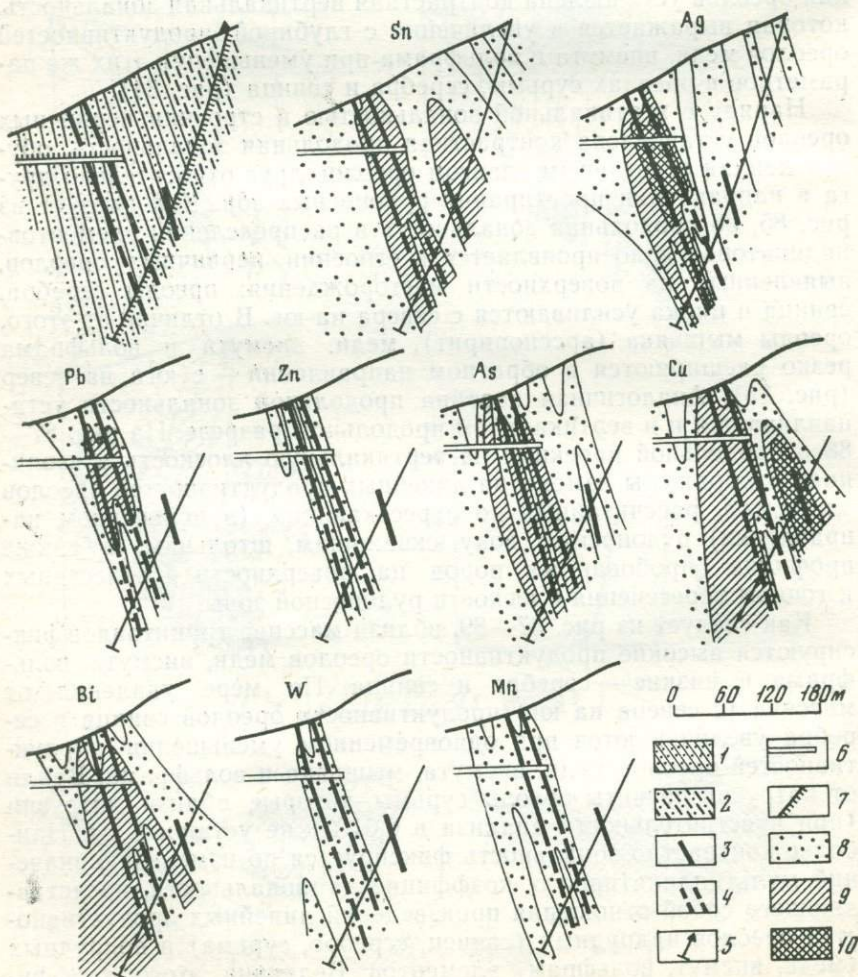
Наряду с вертикальной зональностью в строении первичных ореолов установлена контрастная продольная зональность, обусловленная отчетливым сдвигом ореолов друг относительно друга в направлении простирания рудоносных зон. Как следует из рис. 85, 86 продольная зональность в распределении элементов-индикаторов ярко проявляется в строении первичных ореолов, выявленных на поверхности месторождения: ореолы серебра, свинца и цинка усиливаются с севера на юг. В отличие от этого, ореолы мышьяка (арсенопирит), меди, висмута и вольфрама резко расширяются в обратном направлении — с юга на север (рис. 86). Аналогичная картина продольной зональности устанавливается и в вертикальном продольном разрезе. На рис. 87—88 в продольной проекции на вертикальную плоскость в изолиниях изображены изменения линейных продуктивностей ореолов элементов, рассчитанных по пересекающим (в поперечном направлении) рудоносную зону скважинам, штольням, а также профилям опробованных пород на поверхности и отнесенных к точкам пересечения плоскости рудоносной зоны.

Как следует из рис. 87—89, вблизи массива гранитоидов фиксируются высокие продуктивности ореолов меди, висмута, вольфрама и низкие — серебра и свинца. По мере удаления от массива (с севера на юг) продуктивности ореолов свинца и серебра увеличиваются при одновременном уменьшении продуктивностей ореолов меди, висмута, мышьяка и вольфрама. Вдали от интрузии развиты ореолы сурьмы, которые вблизи интрузии (при чувствительности анализа в 0,01%) не установлены. Наиболее контрастно зональность фиксируется по изменению значений мультипликативного коэффициента зональности, представляющего собой отношения произведений линейных продуктивностей ореолов надрудных (свинец, серебро, сурьма) и подрудных (медь, висмут, вольфрам) элементов. Величина этого коэффи-

коэффициента в исследованном отрезке продольного разреза с севера на юг монотонно меняется более чем в миллион раз. Значительное число пересечений рудных тел и ореолов на близких гипсометрических уровнях позволяет выразить описанную продольную зональность математически с помощью уравнения регрессии. В частности, между логарифмами значений коэффициента (ν) и расстоянием от интрузии R устанавливается прямолинейная тесная корреляционная связь, которая для горизонта с отметкой

Рис. 84. Первичные ореолы вокруг зоны Фестивальной

1 — песчаники; 2 — переслаивание песчаников и алевролитов; 3 — рудное тело; 4 — зона прожилково-вкрапленной минерализации; 5 — разведочные скважины; 6 — штольня; 7 — интервалы опробования; 8 — 10 — первичные ореолы (10 — поля максимальных содержаний элементов)



8,0 усл. ед. характеризуется коэффициентом корреляции $+0,95$ при уровне значимости $0,001$ и среднем квадратическом отклонении $\mp 0,03$. Зависимость между v и R для этого же горизонта при $R < 50$ усл. ед. определяется следующим уравнением регрессии:

$$\lg v = 0,16 R - 5,41.$$

В качестве другого примера продольной геохимической зональности первичных ореолов на рис. 90 приведены частные мультипликативные ореолы элементов-индикаторов медно-висмутового оруденения, выявленные в результате площадного геохимического опробования коренных пород на поверхности месторождения Каптархона (Средняя Азия). Оруденение на этом месторождении локализовано в трещинной рудоносной зоне субширотного направления и круто ($75-80^\circ$) падает на север. В пределах исследованной площади медно-висмутовое оруденение выходит на поверхность и имеет отчетливое западное склонение. Последнее обуславливает асимметрию продольной зональности ореолов, которая выражается в несовпадении в пространстве максимумов ореолов надрудных и подрудных элементов, что, в свою очередь, фиксируется резким сдвигом полей повышенных значений мультипликативного показателя на запад, в полном соответствии с западным склонением оруденения.

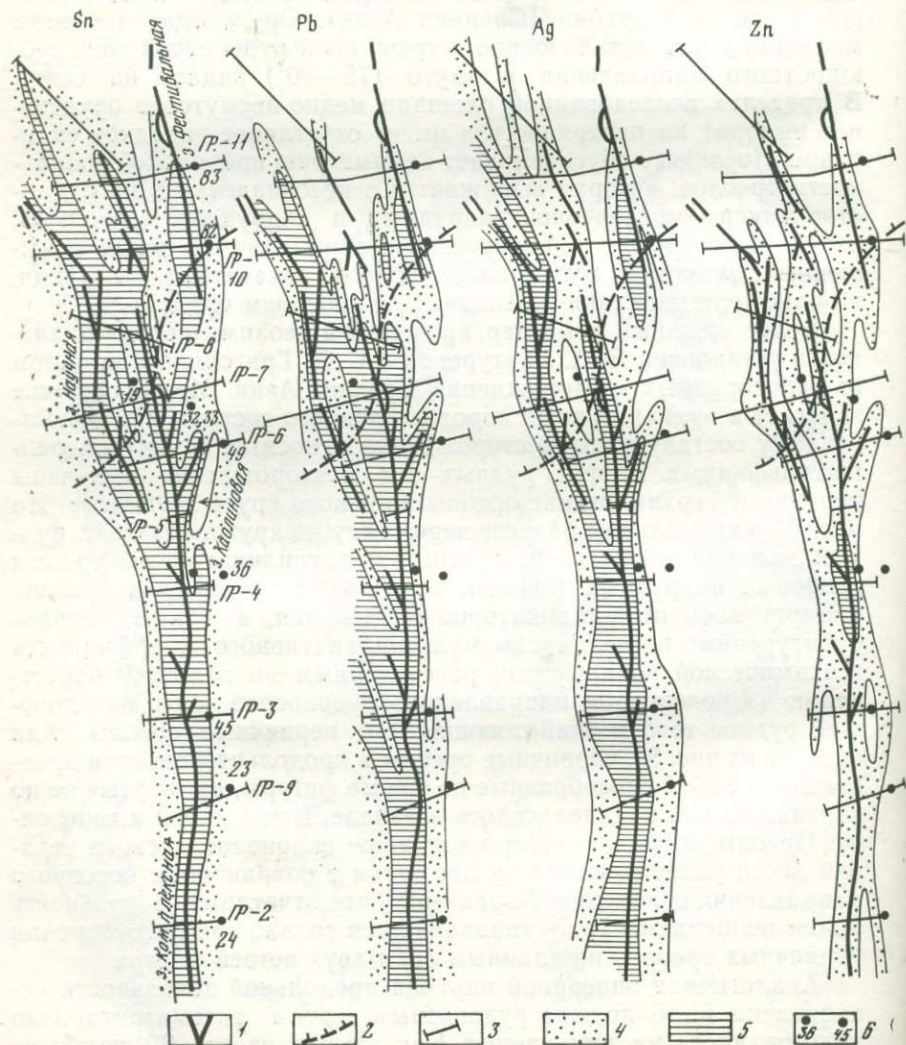
Более сложный характер продольной геохимической зональности установлен Е. А. Абатуровой и С. В. Григорьяном на одном из золоторудных месторождений Средней Азии. Месторождение залегает в вулканогенных породах среднего состава. По вещественному составу руды месторождения относятся к типу умеренно-сульфидных. Вокруг рудных тел месторождения выявлены первичные геохимические ореолы широкого круга элементов. На рис. 91 в продольном разрезе через одну из крутопадающих рудных залежей изображены частные мультипликативные ореолы основных надрудных (свинец, серебро) и подрудных (олово, висмут) элементов-индикаторов оруденения, а также ореолы, оконтуренные по величинам мультипликативного коэффициента геохимической зональности, рассчитанным по каждому пересечению (в поперечном направлении) рудоносной зоны, включающей рудное тело и окаймляющие его первичные ореолы. Как следует из рис. 91, первичные ореолы в продольном сечении представляют собой своеобразные по форме фигуры, вытянутые не по вертикали, как предполагалось в начале, а под углом к горизонту. Ореолы, имеющие северо-восточное склонение, в своей верхней части разветвляются на две ветви с сохранением основного направления склонения. Характерно, что отчетливая зональность в поведении элементов устанавливается только при рассмотрении первичных ореолов по длинным осям двух ветвей фигуры.

Аналогичная описанной картина продольной зональности установлена и по другим рудоносным зонам рассматриваемого золоторудного месторождения. Как следует из рис. 92, наиболее

контрастно геохимическая зональность фиксируется с помощью мультипликативного коэффициента зональности. Изменение величин этого коэффициента отражает как продольную (северо-восточное склонение полей различных значений коэффициента), так и вертикальную зональность. Последняя находит яркое от-

Рис. 85. Первичные ореолы элементов-индикаторов (поверхность месторождения Зимнее)

1 — рудные тела; 2 — условная граница ореола ороговикования и биотитизации пород; 3 — геохимический профиль, его номер; 4, 5 — первичные ореолы (4 — поля повышенных содержаний); 6 — буровые скважины



ражение в приуроченности полей максимальных значений коэффициента зональности исключительно к верхним частям разреза.

При геохимических поисках в основном проводится геохимическое опробование поверхности, поэтому в практическом отношении является наиболее важным изучение продольной зональности ореолов, выявленных в плане. Продольную геохимическую

Рис. 86. Первичные ореолы подрудных элементов-индикаторов (поверхность месторождения Зимнее)

Усл. обозначения см. рис. 85

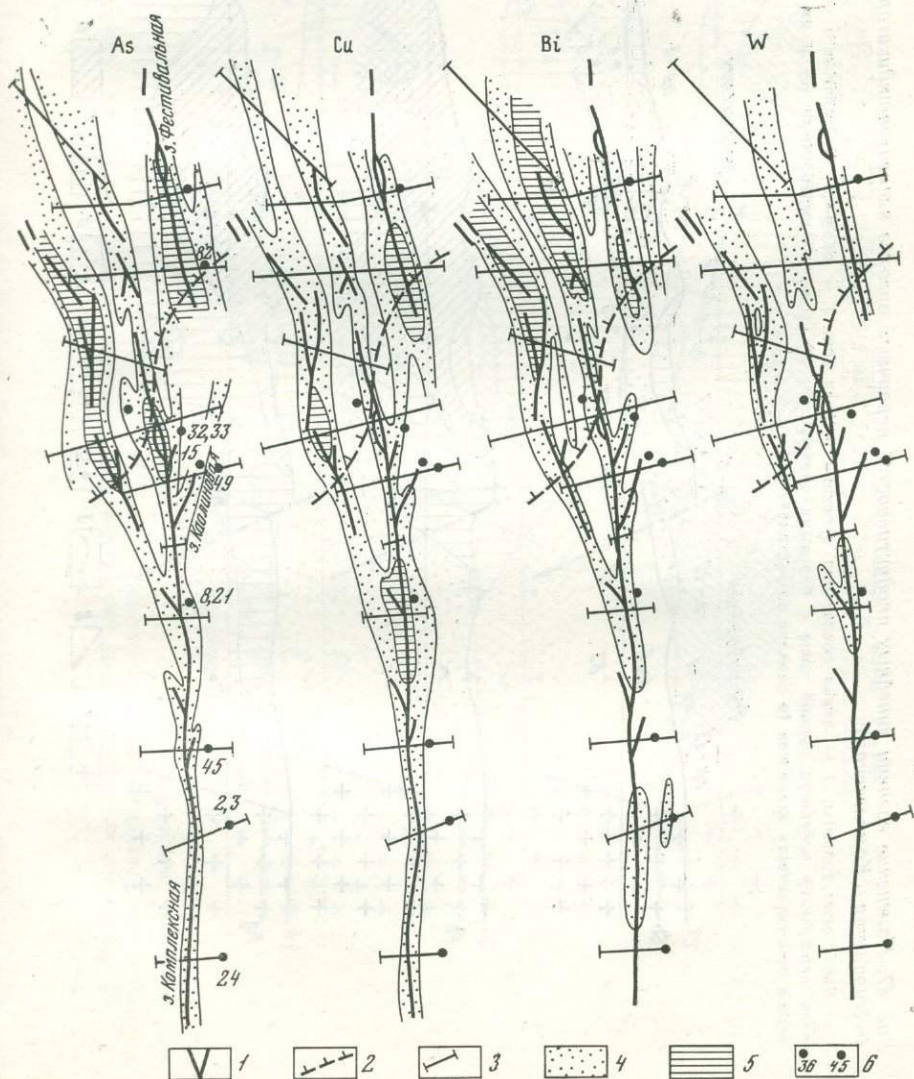


Рис. 87. Изменение величин линейных продуктивностей первичных ореолов элементов-индикаторов (продольный разрез зон Фестивальная и Комплексная)

1 — биотитовые граниты; 2 — линия сочленения проекций рудных зон; 3 — профили геохимического опробования, их номера; 4, 5 — точки пересечения плоскости рудной зоны с буровыми скважинами (4), горными выработками (5) и их номера; 6 — 9 — величины линейной продуктивности элементов (в порядке возрастания)

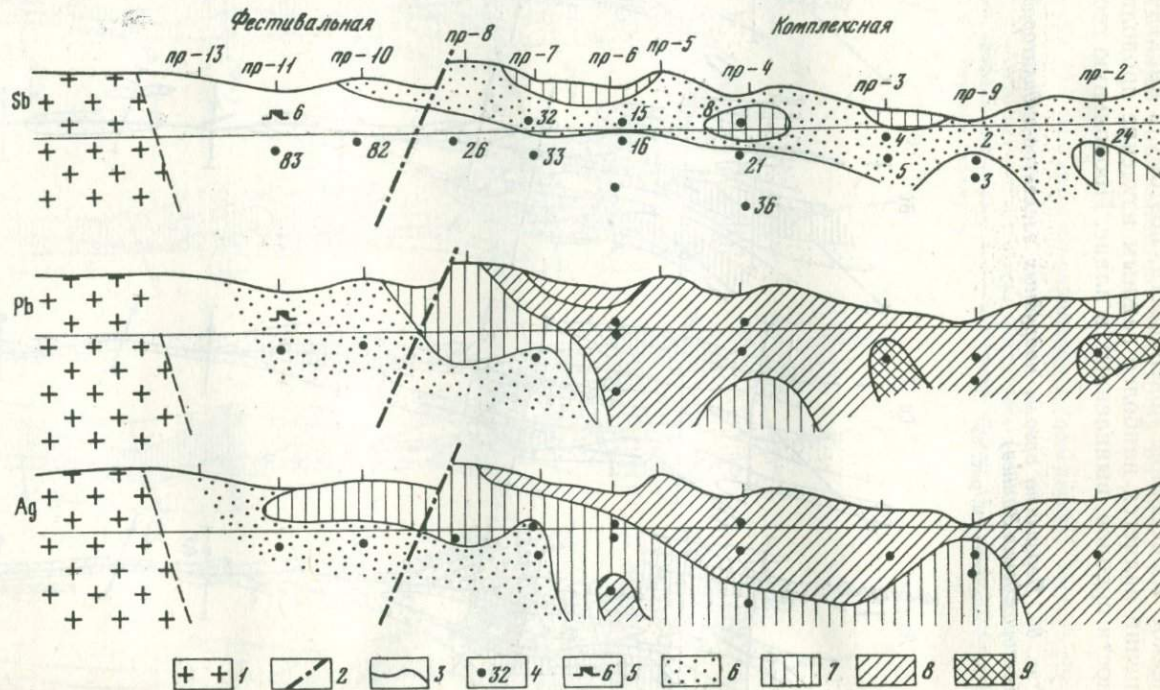


Рис. 88. Изменение величин линейных продуктивностей первичных ореолов подрудных элементов-индикаторов (продольный разрез зон Фестивальная и Комплексная)

Усл. обозначения см. рис. 87

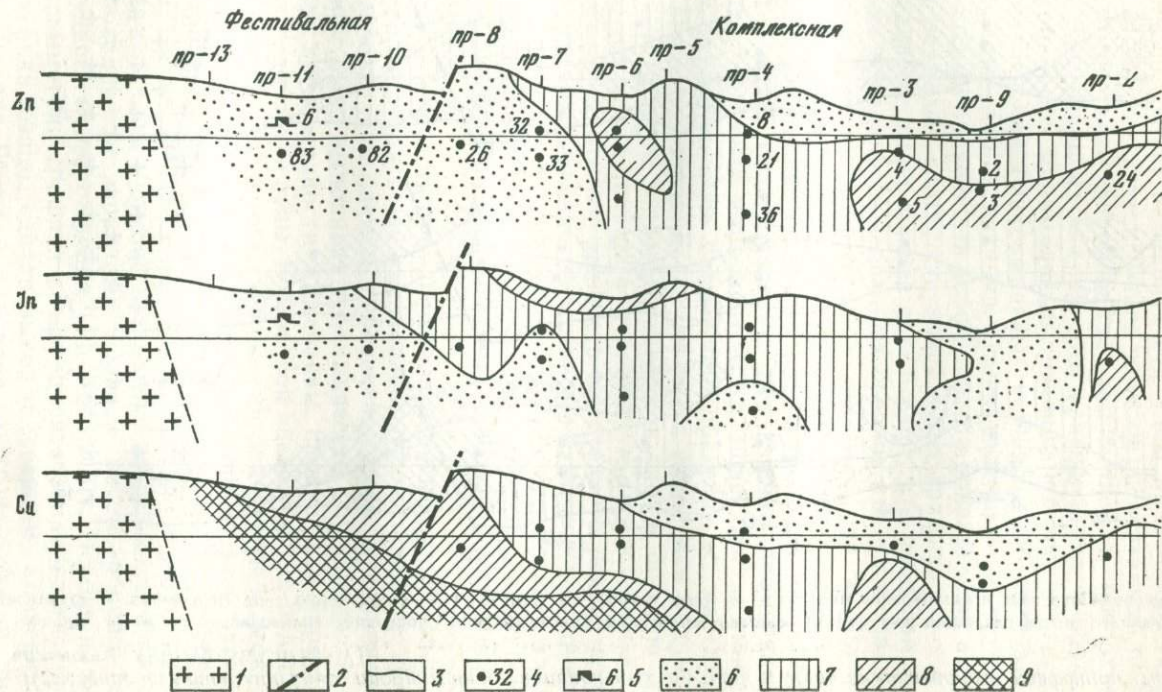
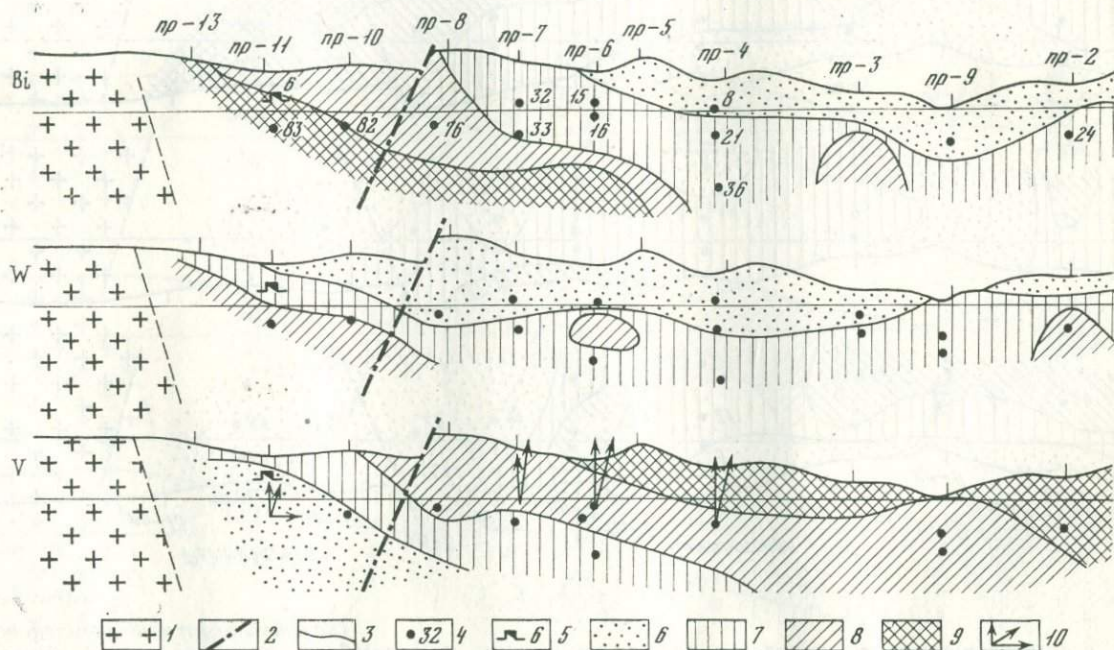


Рис. 89. Изменение величин линейных продуктивностей первичных ореолов и мультипликативного коэффициента геохимической зональности (Pb·Ag·Sb/Cu·Bi·W)

1—5 — см. рис. 87; 6—9 — величины линейной продуктивности первичных ореолов (в порядке возрастания) и мультипликативного коэффициента (6 — менее 0,01; 7 — 0,01—1,0; 8 — 1,0—1000; 9 — более 1000); 10 — векторы зональности в трех направлениях



зональность первичных ореолов в плане можно графически изобразить также с помощью графика изменения по простиранию рудных зон величин коэффициента геохимической зональности. На рис. 93 по описанному выше продольному разрезу рудоносной зоны построен график изменения величины мультипликативного коэффициента геохимической зональности, рассчитанный по данным геохимического опробования ближайшей к поверхности штольни. Как видно из рис. 93, этот график имеет V-образную форму с областью минимальных значений коэффициента в интервале оруденения (максимальных концентраций золота). Характерно также, что висячий бок рудной залежи характеризуется более высокими значениями коэффициента зональности, а также большим размахом соответствующей ветви графика.

Приведенные выше данные показывают, что продольная геохимическая зональность первичных ореолов имеет не только научное, но и большое практическое значение: она может быть использована для определения склонения рудных тел во избежание ошибок при оценке аномалий и рудопроявлений. Не исключено, что многие рудопроявления, показавшие промышленные содержания полезных компонентов на поверхности, ошибочно получили отрицательную оценку при проверке их на глубину, так как проверка выполнялась без учета склонения рудных тел и скважины, обычно закладываемые под самую богатую часть рудного тела, могли попасть в его лежащую (по склонению) безрудную часть. Учитывая важность отмеченного выше аспекта практического применения продольной геохимической зональности первичных ореолов, рассмотрим пример определения наличия вероятного направления склонения крутопадающей рудной залежи по характеру продольной геохимической зональности первичных ореолов.

На одном из участков рудного поля описываемого золоторудного месторождения были установлены промышленные концентрации золота. Для оценки перспектив этого рудопроявления на глубину было выполнено геохимическое опробование коренных пород на поверхности по канавам, пройденным вкрест простирания рудоносной зоны. В северной части участка рудоносная зона перекрыта рыхлыми отложениями значительной мощности и поэтому опробование рудовмещающих пород в этой части участка выполнено по керну короткометражных картировочных скважин. На рис. 94 приведен график изменения вдоль рудоносной зоны величины мультипликативного коэффициента геохимической зональности первичных ореолов рассмотренного выше золоторудного месторождения (Pb·Ag/Sn·Bi). Исходя из отчетливой асимметрии графика коэффициента зональности (правая ветвь графика выше), сделан вывод о северном склонении оруденения (см. рис. 94, а). Установлен также неглубокий уровень эрозионного среза, исходя из величин коэффициента геохимической зональности в интервале оруденения (~ 1000), соответствующих верхним частям рудных тел. Выполненное на участке

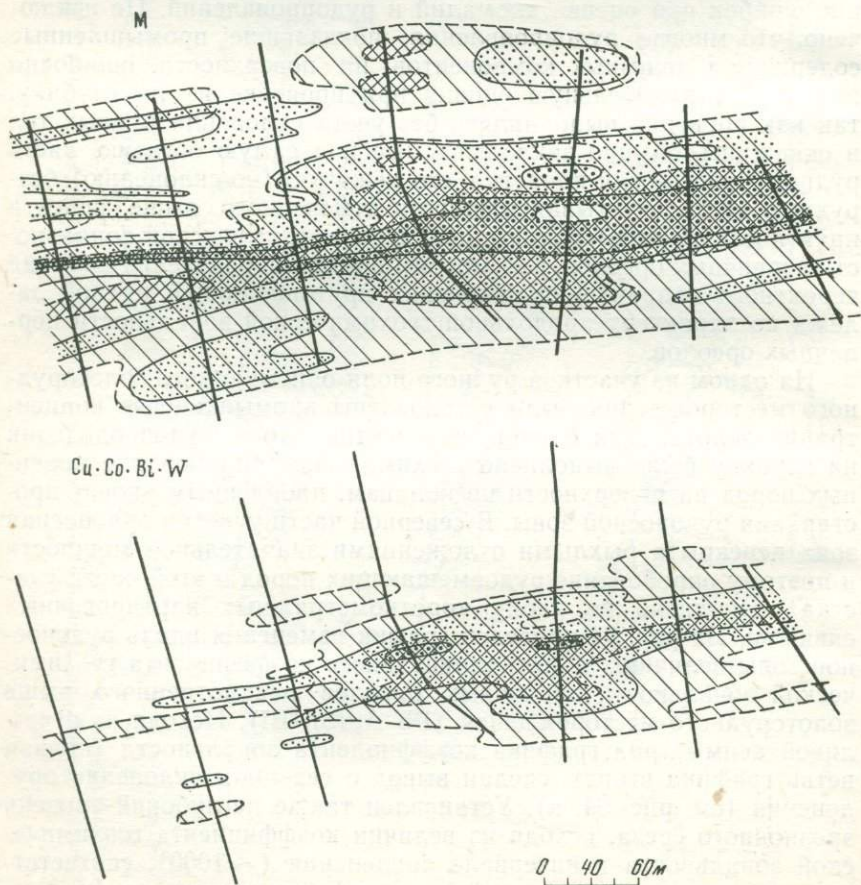
впоследствии бурение полностью подтвердило правильность интерпретации данных геохимического опробования: перспективы на глубину были подтверждены, а склонение оруденения оказалось действительно северным (см. рис. 94, б).

Ореолы пологого залегания

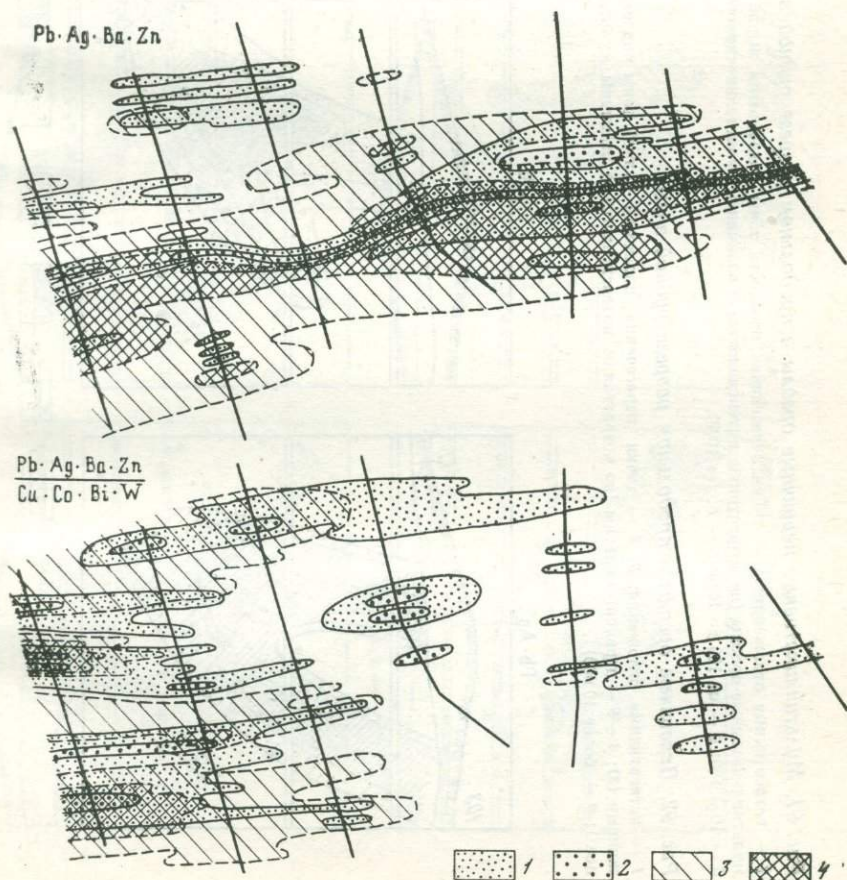
Ореолы этого типа, как правило, развиваются согласно вокруг рудных тел пологого залегания. Типичным примером служат первичные ореолы, выявленные вокруг рудных тел скарново-полиметаллического месторождения Тутлы-1 (Курусайское рудное поле, Средняя Азия). Рудные тела месторождения Тутлы-1 расположены в пределах толщи известняково-аркозовых конгло-

Рис. 90. Мультипликативные первичные и вторичные ореолы

1, 2 — первичные ореолы (2 — поля повышенных концентраций); 3, 4 — вторичные ореолы (4 — поля повышенных концентраций)



мератов акчинской свиты (C_{2-3}), залегающих на размытой поверхности андезито-дацитовых порфиров той же свиты. На месторождении развиты крутопадающие дизъюнктивные нарушения северо-восточного и меридионального направления, вдоль которых восстанавливаются смещения отдельных блоков толщи конгломератов. Рудные тела представляют собой линзообразные пологозалегающие ($10-15^\circ$), местами почти горизонтальные, мощностью несколько метров, залежи в скарнах. Основными скарновыми минералами являются гранат (андрадит-гроссуляр) и пироксен (манган-геденбергит). Полиметаллическое оруденение преимущественно развивается в пироксеновых скарнах и представлено следующими основными рудными минералами: галенит, сфалерит, пирит, блеклые руды, халькопирит. Локализация оруденения происходила в наиболее ослабленных зонах, в местах отслоения отдельных пропластков конгломератов друг от друга. Этим объясняется согласное вмещающей толще залегание руд-



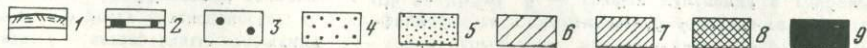
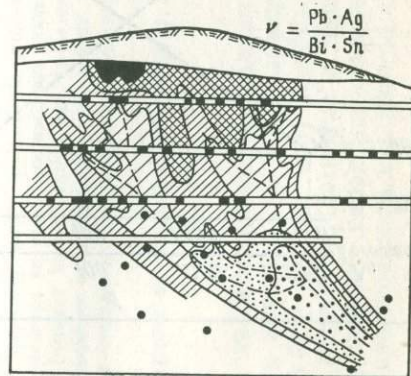
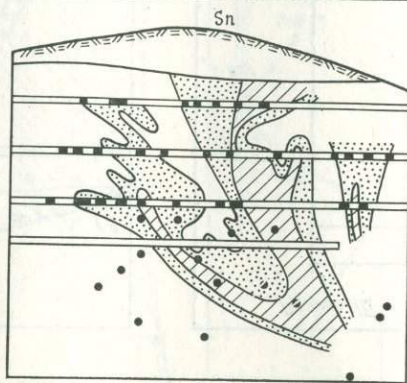
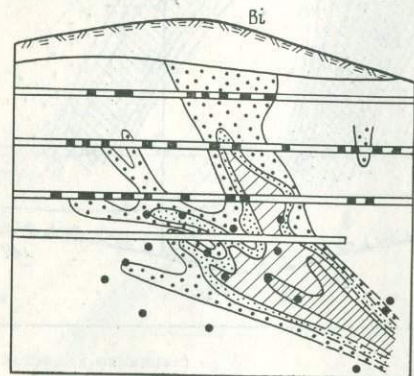
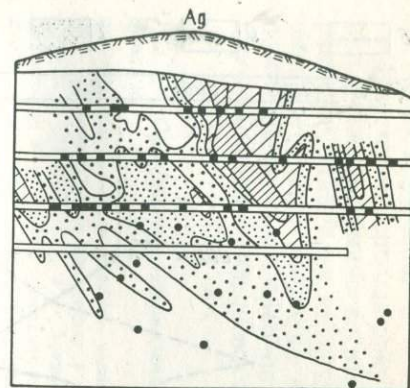
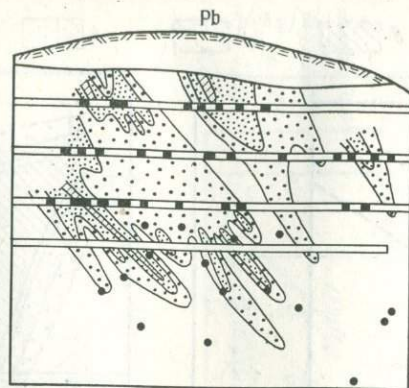
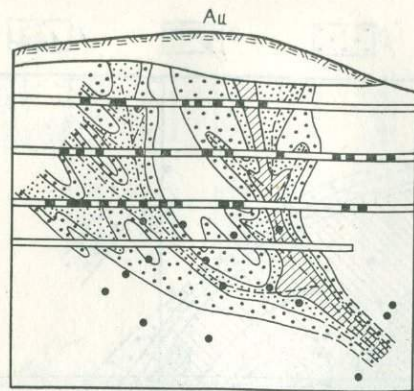
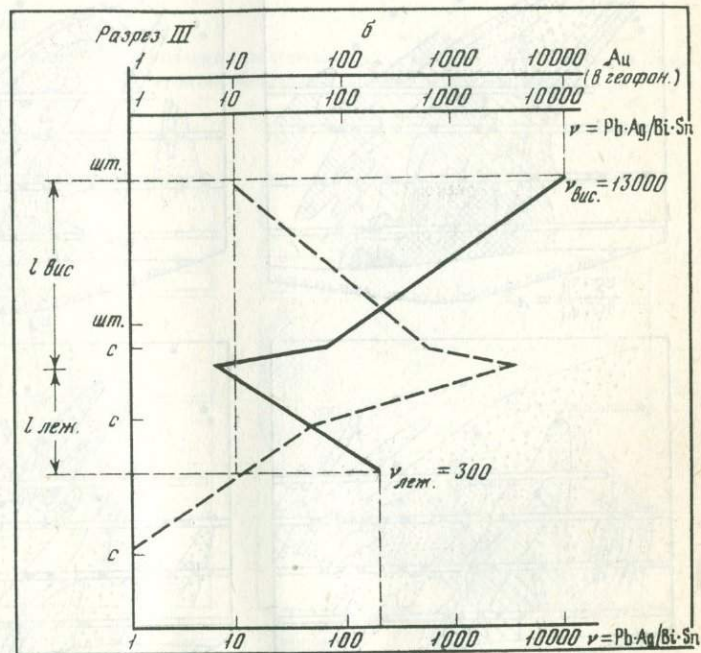
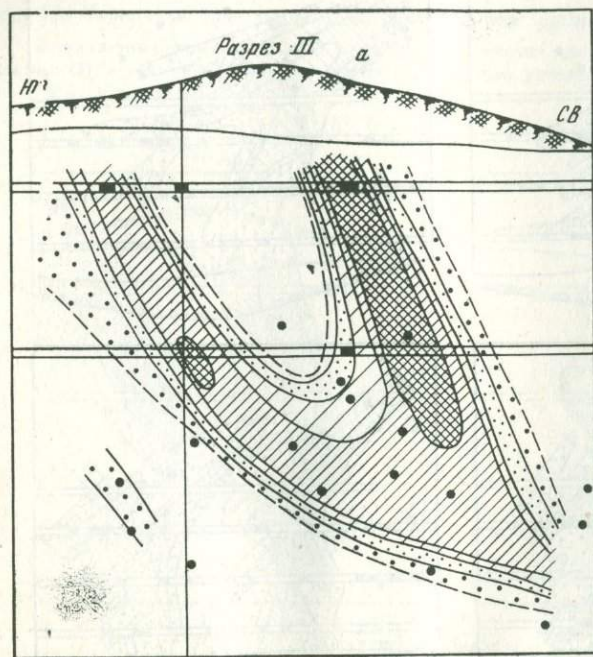


Рис. 93. Геохимические особенности оруденения со склонением (продольный разрез рудной зоны)

a — первичный ореол золота; *1* — четвертичные отложения, *2* — точки пересечения подземными выработками и буровыми скважинами, *3—7* — поля ореолов золота (по росту интенсивности); *б* — графики золота и геохимической зональности; *8* — график изменения с глубиной величины мультипликативного коэффициента зональности ($Pb \cdot Ag / Bi \cdot Sn$), *9* — график изменения с глубиной концентрации золота (в условных единицах)

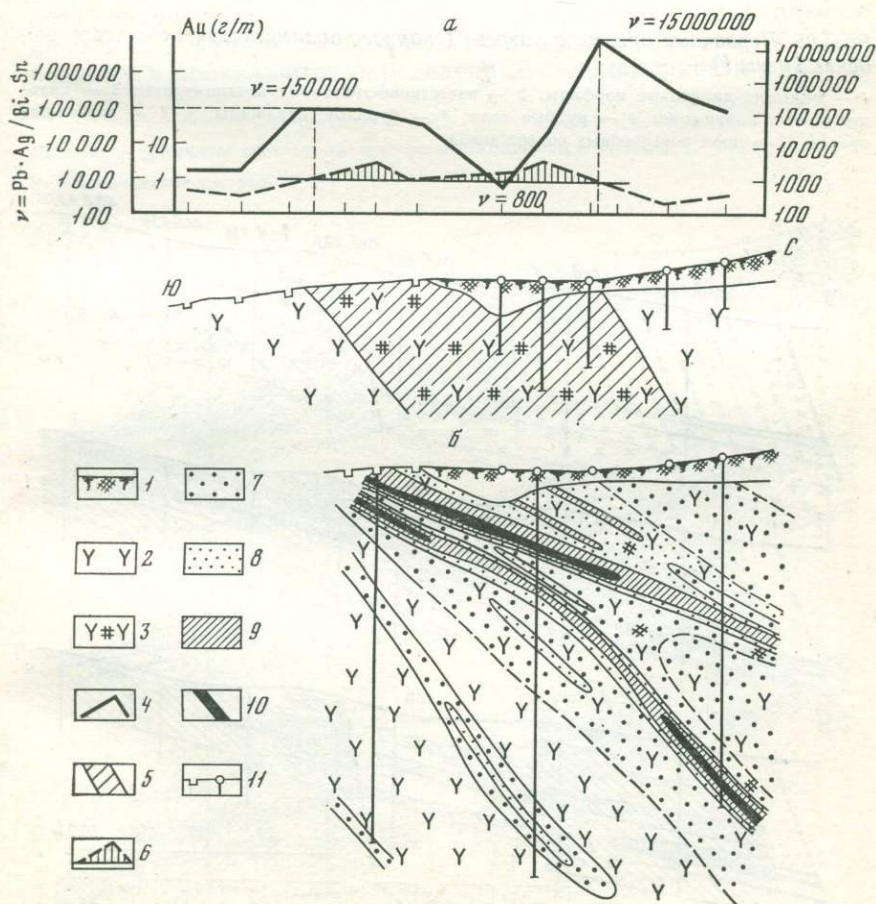


ных тел и закономерное увеличение их мощности вблизи тектонических нарушений.

Первичные ореолы вокруг рудных тел месторождения изучены путем геохимического опробования кернa скважин по ряду разрезов. Наиболее интенсивны и значительны ореолы свинца, цинка, серебра, мышьяка и сурьмы (рис. 95, 96). Характерной особенностью этих ореолов является то, что они, как и ореолы крутопадающих тел, резко вытянуты вдоль рудных тел, но в го-

Рис. 94. Определение направления склонения оруденения по геохимическим данным

а — прогноз; б — проверка; 1 — четвертичные отложения; 2 — андезитовые порфириты; 3 — гидротермальные изменения; 4 — график мультипликативного коэффициента зональности ($Pb \cdot Ag / Bi \cdot Sn$); 5 — предполагаемое (по геохимическим данным) склонение оруденения; 6 — график изменения средних содержаний золота на поверхности (в условных единицах); 7—10 — поля различных содержаний золота (по росту концентрации); 11 — каналы и буровые скважины

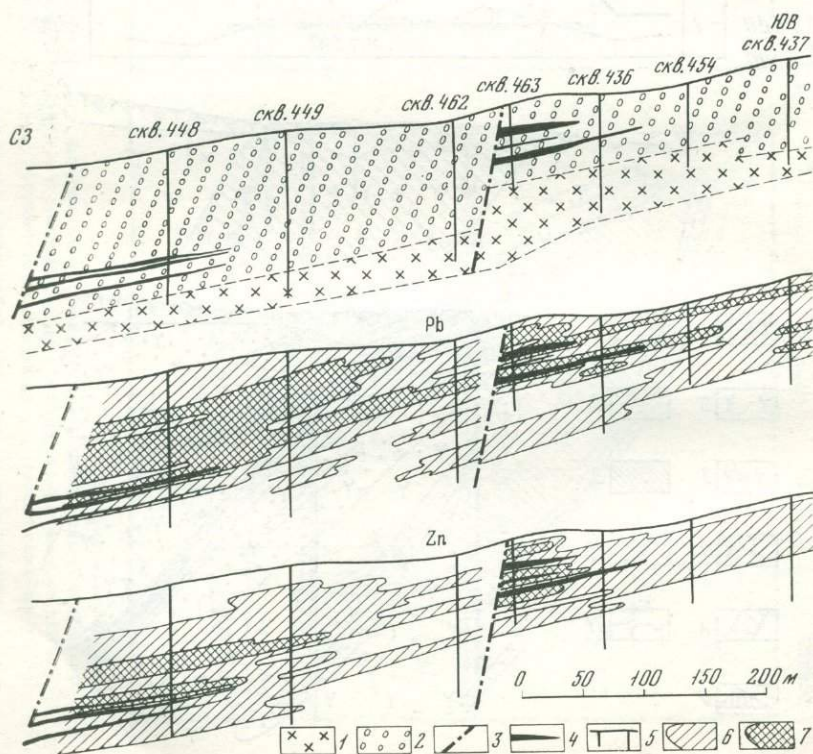


горизонтальной плоскости, и существенно превышают их по размерам. Горизонтальная протяженность рудных тел месторождения в среднем составляет десятки метров, тогда как протяженность ореолов, как следует из приведенных рисунков, значительно превосходит 200 м (ореолы по этим размерам полностью не оконтурены из-за ограниченной протяженности исследованных разрезов). Как следует из рис. 96, в строении первичных ореолов проявлена контрастная зональность, которая выражается в усилении ореолов сурьмы и мышьяка по мере удаления от рудных тел. Наиболее контрастно отмеченная зональность проявляется в строении мультипликативных ореолов (рис. 97).

Другим примером первичных ореолов рудных тел пологого залегания является пологая рудоносная зона Узун, расположенная в пределах описанного выше золоторудного месторождения. Для межформационных структур типа зоны Узун характерно интенсивное проявление гидротермальных процессов, большая

Рис. 95. Первичные ореолы в разрезе (скарново-полиметаллическое месторождение Тутлы I)

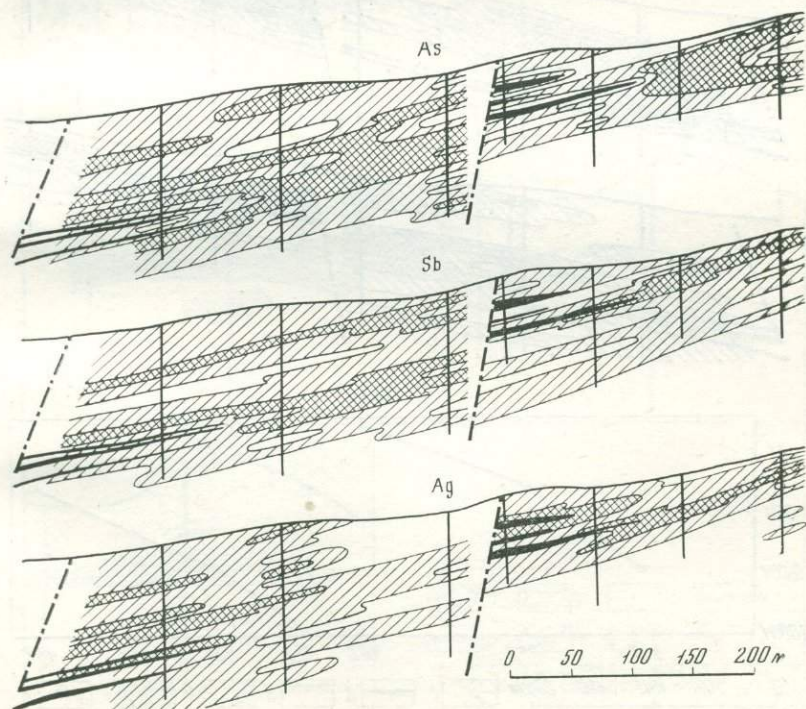
1 — андезитово-дацитовые порфиры; 2 — известково-аркозовые конгломераты; 3 — дизъюнктивные нарушения; 4 — рудные тела; 5 — буровые скважины; 6, 7 — первичные ореолы (7 — поля повышенных содержаний)



мощность и протяженность гидротермально-измененных пород. Но несмотря на это, в балансе распределения золотого оруденения описываемого месторождения они значительно уступают рассмотренным выше секущим структурам. Для изучения геохимических особенностей зоны использован керн скважин, пробуренных по нескольким профилям, ориентированным вкрест простирания рудной зоны. Обработка результатов геохимического опробования керна скважин позволила выявить первичные ореолы по элементному составу, аналогичные описанным выше ореолам вокруг крутопадающих рудных тел. Ширина ореолов основных элементов-индикаторов достигает 20—30 м, что значительно превосходит мощность рудных тел. Внешний контур ореолов выходит в стороны лежащего и особенно висящего боков рудной зоны. Поля максимальных концентраций элементов в ореолах совпадают с контурами рудных тел.

На рис. 98 изображены первичные ореолы, выявленные по одному из разрезов через рудоносную зону. Как видно из разреза, рудоносная зона на западе пересекается крутопадающим на запад секущим разломом. Именно по отношению к этому разлому и проявляются определенные закономерности в распре-

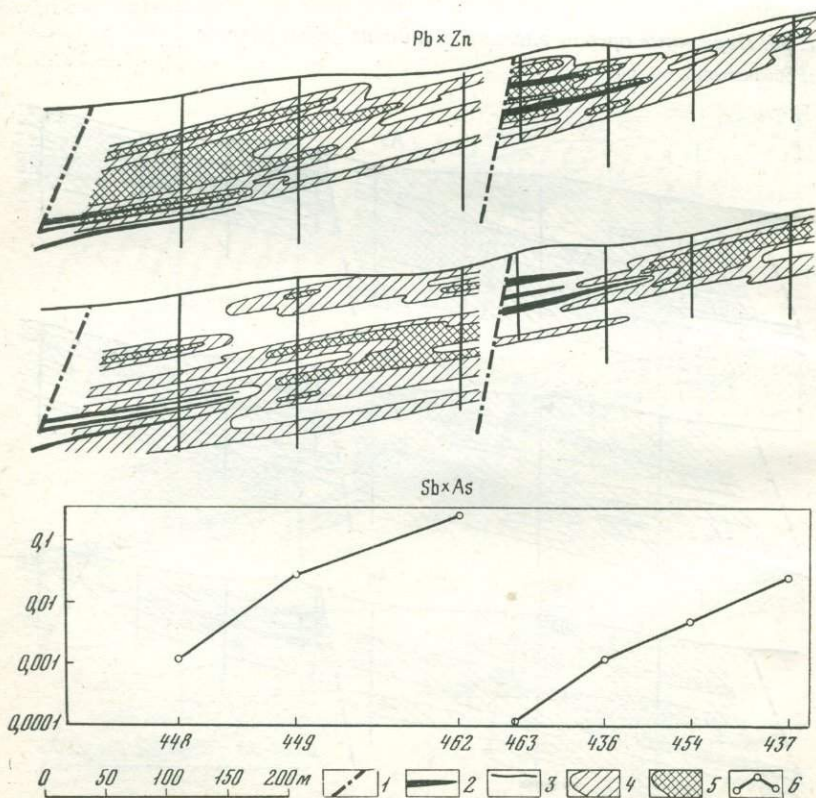
Рис. 96. Первичные ореолы элементов-индикаторов в разрезе
Усл. обозначения см. рис. 95



делении элементов-индикаторов. По особенностям ореолов можно выделить следующие три группы элементов-индикаторов. Для элементов первой группы (к ним относятся золото, сурьма, серебро, цинк) характерны достаточно широкие (до 30 м) интенсивные ореолы, тесно коррелирующие с рудным телом. Ореолы второй группы элементов — мышьяка и свинца — несколько более узкие, имеют тенденцию увеличения ширины и интенсивности по мере удаления в восточном направлении. Ореолы этих элементов дают картину факелообразного расширения в направлении от секущего разлома. И, наконец, третью группу элементов составляют медь, олово, висмут, для которых характерно увеличение концентраций вблизи секущего разлома и уменьшение или полное выклинивание ореолов в восточном направлении. Таким образом, даже просто сравнение морфологии первичных ореолов позволяет выявить зональность ореолов и высказать

Рис. 97. Частные мультипликативные ореолы

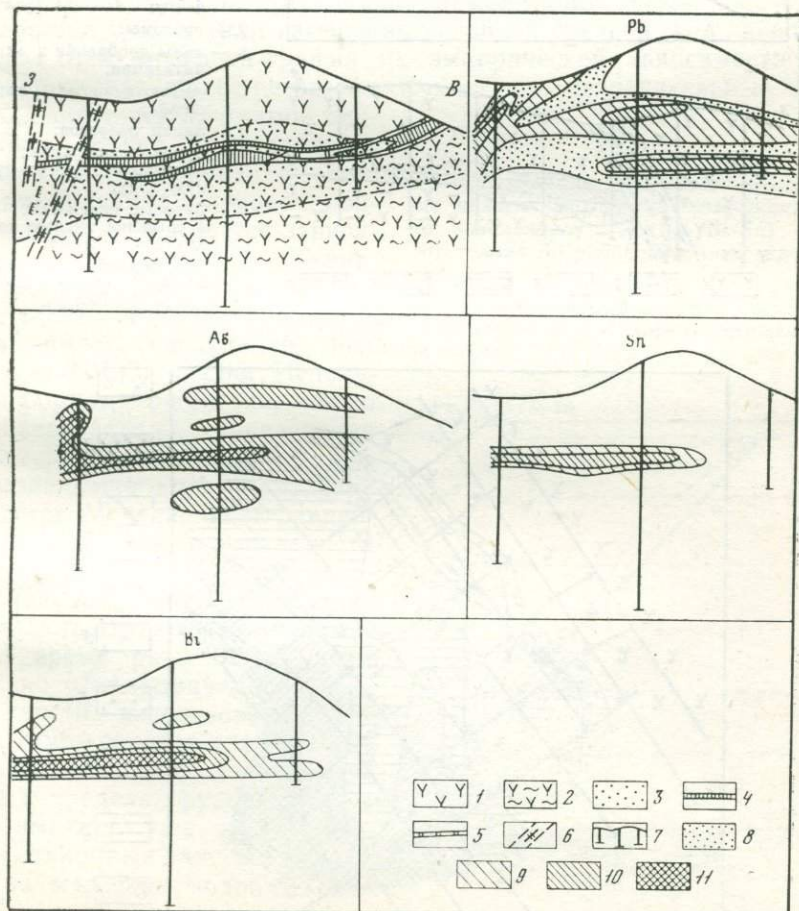
1 — дизъюнктивные нарушения; 2 — рудные тела; 3 — буровые скважины; 4, 5 — первичные ореолы (5 — поля ореолов повышенной интенсивности); 6 — графики изменения мультипликативного коэффициента зональности ($Sb \cdot As / Pb \cdot Zn$)



предположение, что секущий разлом, вскрытый отдельными скважинами в лежащем боку рудоносной зоны Узун, является рудоподводящим. Этот вывод подтверждается приведенными на рис. 99 графиками изменения средних содержаний элементов по скважинам. Как следует из рис. 99, наибольшая способность накапливаться в удаленных от рудоподводящего канала частях ореолов характерна для свинца и мышьяка: средние содержания этих элементов возрастают по мере удаления от рудоподводящего канала (примерно с одинаковым градиентом). В противоположность этому, для олова, висмута и меди рост средних

Рис. 98. Первичные ореолы элементов-индикаторов вокруг рудного тела полого залегания

1 — андезито-дацитовые порфиры; 2 — туфы; 3 — гидротермально-измененные породы; 4 — кварц-золоторудные тела; 5 — кальцитовые тела; 6 — зоны дробления; 7 — буровые скважины; 8 — 11 — первичные ореолы (по возрастанию интенсивности)



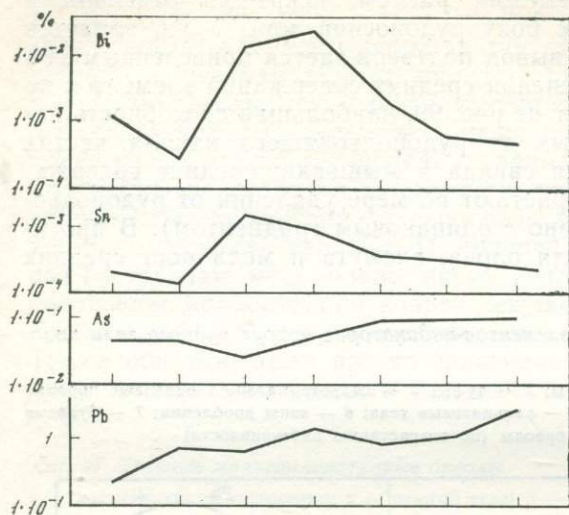


Рис. 99. Графики изменения средних содержаний элементов-индикаторов в разрезе

- 1 — андезито-дацитовые порфиры;
- 2 — туфы;
- 3 — гидротермально - измененные породы;
- 4 — кварцево - золоторудное тело;
- 5 — зоны дробления;
- 6 — буровые скважины

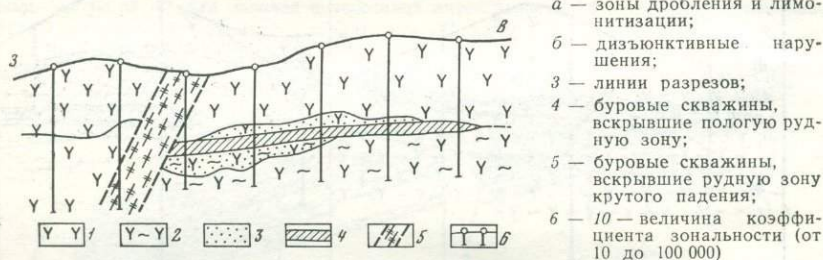
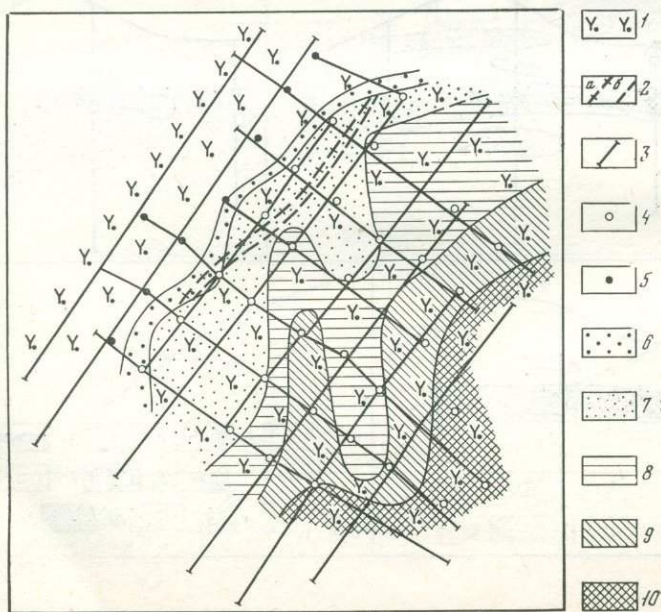


Рис. 100. Изменение величины мультипликативного коэффициента зональности ($Pb \cdot Ag / Bi \cdot Sn$)

- 1 — андезито-дацитовые порфиры;
- 2 — разломы;
- а — зоны дробления и лимонитизации;
- б — дизъюнктивные нарушения;
- 3 — линии разрезов;
- 4 — буровые скважины, вскрывшие пологую рудную зону;
- 5 — буровые скважины, вскрывшие рудную зону крутого падения;
- 6 — 10 — величина коэффициента зональности (от 10 до 100 000)



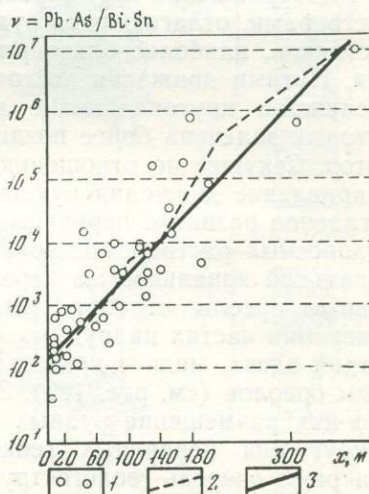
содержаний происходит в обратном направлении. В качестве количественной оценки описанной геохимической зональности (по простираанию рудных тел) выбран мультипликативный коэффициент следующего вида: $Pb \cdot As / Bi \cdot Sn$.

Для получения более полной информации о характере геохимической зональности первичных ореолов описываемой рудоносной зоны, значения коэффициента, рассчитанные по каждой из скважин, вынесены на горизонтальную проекцию рудоносной зоны. Эти данные (рис. 100) вскрывают проявленную в плане контрастную геохимическую зональность: по мере удаления от рудоподводящего разлома крутого падения величина коэффициента зональности монотонно возрастает, что отчетливо фиксирует юго-восточное направление движения (от подводящего канала) рудоносных растворов. Выдержанный характер зональности иллюстрируется рис. 101, на котором графически изображена зависимость величины коэффициента геохимической зональности от расстояния до рудоподводящего канала. Видно, что точки (y_x, x) группируются около прямой линии. Путем подсчета регрессии y на x (или изменения условной средней y_x в зависимости от x) построен график их эмпирической зависимости — эмпирическая линия регрессии. Считая, что незначительные отклонения точек от прямой случайны, можно предположить,

что в данном случае имеется прямолинейная корреляционная связь, т. е. имеется зависимость вида $y_x = ax + b$. Уравнение регрессии, определенное способом наименьших квадратов, имеет следующий вид $\lg v_3 = 0,0137x + 2,05$. Используя формулу регрессии, можно решать задачу определения примерного расстояния до рудоподводящего источника, если имеется значение коэффициента геохимической зональности v_3 в определенной точке рудоносной зоны пологого залегания. Естественно, что в настоящее время речь может идти только о принципиальной возможности использования зональности ореолов для решения указанной выше задачи, причем в пределах рудных полей, где имеются уже исследованные эталонные участки. Разработка методики подобных оп-

Рис. 101. График зависимости величины мультипликативного коэффициента зональности ($Pb \cdot Ag / Bi \cdot Sn$) от расстояния до рудоподводящей структуры

1 — точки наблюдений; 2 — эмпирическая линия регрессии; 3 — теоретическая линия регрессии



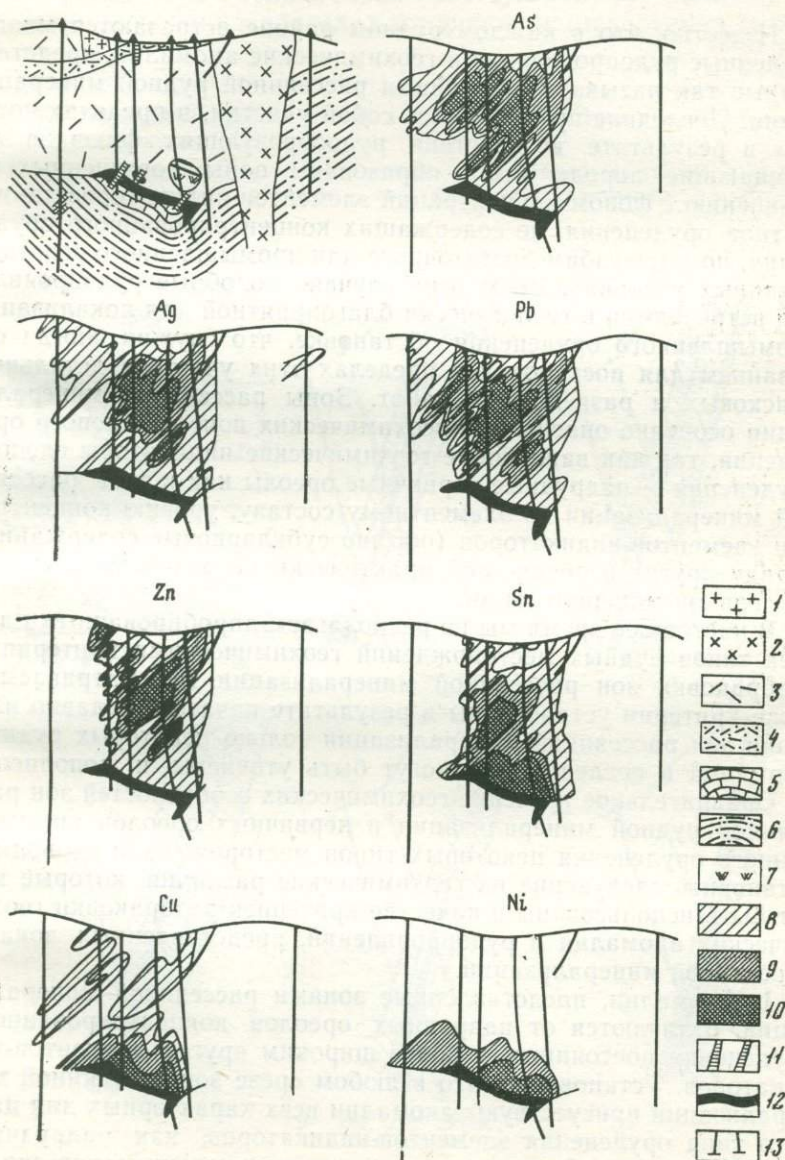
ределений по результатам более представительных данных представляет собой задачу дальнейших исследований, актуальность и очевидная перспективность которых подтверждаются приведенными весьма конкретными примерами проявления пространственной геохимической зональности в строении первичных геохимических ореолов рудоносных зон субгоризонтального залегания.

Выше были рассмотрены особенности зонального строения первичных ореолов, развивающихся согласно с соответствующими рудными телами. Однако, как показывают исследования, согласное с рудными телами развитие первичных ореолов является наиболее распространенным, но не единственно возможным случаем. Иногда вокруг рудных тел пологого залегания развиваются первичные ореолы крутого падения. Подобные ореолы, в частности, установлены на скарново-полиметаллическом месторождении Николаевское (рис. 102). Несмотря на пологое залегание рудной залежи первичные ореолы Николаевского месторождения резко отличаются от рассмотренных выше ореолов месторождения Тутлы-1 прежде всего размерами в плане (в плоскости рудной залежи): они невелики и существенно не превосходят рудную залежь. Другой отличительной особенностью ореолов этого месторождения является их значительная вертикальная протяженность: по описываемому разрезу они превосходят 850 м и, следовательно, по особенностям развития первичных ореолов Николаевское месторождение, несмотря на пологое залегание, скорее является аналогом месторождений с крутопадающими телами. Причина подобного несогласного развития первичных ореолов заключается в своеобразных условиях локализации оруденения и сопровождающих его первичных ореолов.

Месторождение формировалось восходящими рудоносными растворами, отлагающими руды в пределах скарнированных известняков, наиболее благоприятных для локализации оруденения. Пути движения восходящих растворов, вероятнее всего, послужили крутопадающие дизъюнктивные нарушения, часть которых залечена более поздними дайками диабазовых порфиров. Секущее по отношению к скарнированным известнякам направление движения рудоносных растворов и определяет несогласное развитие первичных ореолов. Восходящий характер рудоносных растворов однозначно фиксируется отчетливой вертикальной зональностью первичных ореолов: наиболее интенсивные ореолы серебра, мышьяка, свинца и цинка развиты в верхних частях надрудных ореолов. Поля повышенных содержаний олова, меди и никеля, напротив, тяготеют к нижним частям ореолов (см. рис. 102). Эти данные отчетливо показывают, что как размещение рудных тел, так и особенности развития вокруг них первичных геохимических ореолов определяются в первую очередь геологоструктурными условиями локализации эндогенного оруденения, и это обстоятельство должно быть уч-

Рис. 102. Первичные ореолы элементов-индикаторов (Николаевское скарново-полиметаллическое месторождение, Приморье)

1 — кварцевые порфиры; 2 — габбро-диориты; 3 — туфы и туфобрекчии кварцевых порфиров; 4 — туффиты; 5 — известняки; 6 — алевролиты, песчаники; 7 — кремнистые породы; 8 — 11 — первичные ореолы (11 — поля максимальных содержаний); 11 — дайки порфириров; 12 — рудные тела; 13 — буровые скважины



тено как при изучении первичных ореолов, так и в особенности в случае их практического использования при поисковых и разведочных работах.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗОН РАССЕЯННОЙ РУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Известно, что в каждом рудном районе встречаются многочисленные рудопроявления и геохимические аномалии, представляемые так называемыми зонами рассеянной рудной минерализации. Последние представляют собой участки, в пределах которых в результате воздействия рудообразующих флюидов на вмещающие породы были образованы зоны повышенных по сравнению с фоном концентраций элементов-индикаторов данного типа оруденения, не содержащих концентрированного оруденения, по масштабам достаточного для промышленного освоения в данных условиях. Во многих случаях подобные рудопроявления встречаются в геологически благоприятной для локализации промышленного оруденения обстановке, что служит иногда основанием для постановки в пределах этих участков детальных поисковых и разведочных работ. Зоны рассеянной минерализации особенно опасны при геохимических поисках слепого оруденения, так как важнейшие геохимические индикаторы слепого оруденения — надрудные первичные ореолы как и зоны рассеянной минерализации по элементному составу, уровню концентрации элементов-индикаторов (обычно субкларковые содержания) и ряду других особенностей практически не отличаются от зон рассеянной минерализации.

В настоящее время мы не располагаем апробированными для всех типов рудных месторождений геохимическими критериями разбраковки зон рассеянной минерализации. Рассматриваемые ниже критерии установлены в результате начатого недавно изучения зон рассеянной минерализации только некоторых рудных формаций в последующем могут быть уточнены и дополнены.

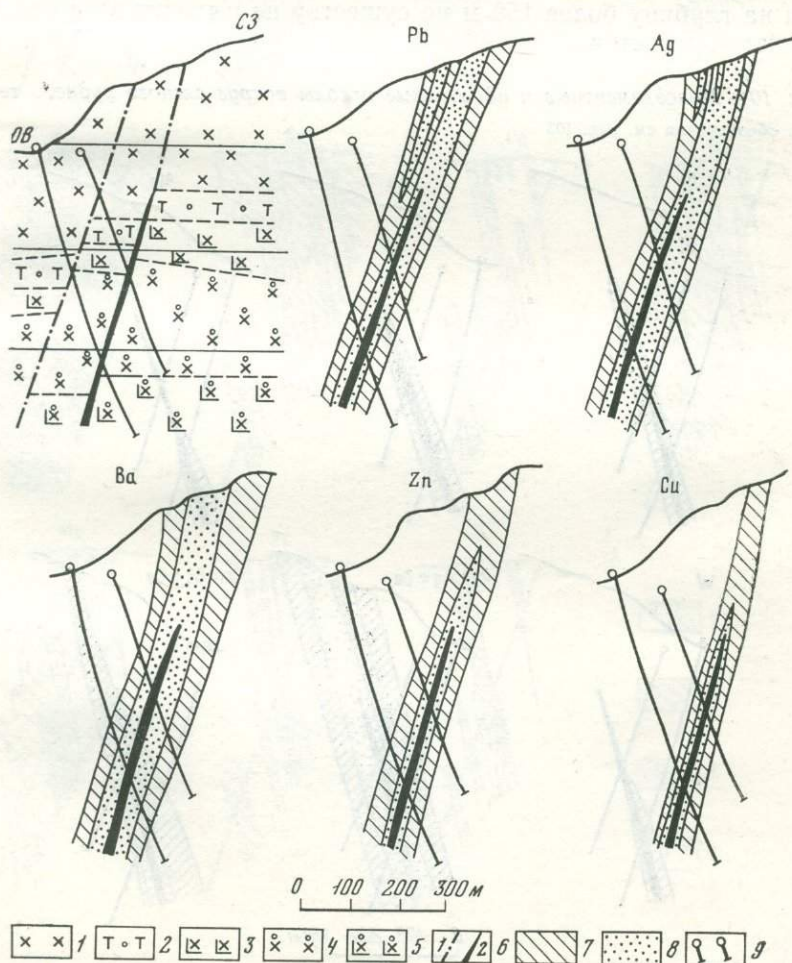
Сравнительное изучение геохимических особенностей зон рассеянной рудной минерализации и первичных ореолов промышленного оруденения некоторых типов месторождений позволило установить следующие их геохимические различия, которые могут быть использованы в качестве критериев разбраковки геохимических аномалий и рудопоявлений, представленных зонами рассеянной минерализации.

1. Аномалии, представленные зонами рассеянной минерализации, отличаются от надрудных ореолов концентрированного оруденения постоянным и более широким кругом элементов-индикаторов. Установлено, что в любом срезе зон рассеянной минерализации присутствуют аномалии всех характерных для данного типа оруденения элементов-индикаторов, как надрудных, так и подрудных. В отличие от этого в надрудных частях околорудного пространства концентрированного оруденения аномалии

типичных подрудных элементов обычно отсутствуют, что иллюстрируется приведенными на рис. 103—105 разрезами через полиметаллическое месторождение Ямансай и рудопроявление Кызылташ (оба в Центральном Карамазаре). Как установлено детальным изучением поверхности, а также бурением ряда скважин, рудопроявление Кызылташ не содержит промышленного оруденения и представляет собой типичную зону рассеянной рудной минерализации, в пределах которой на исследованных срезях

Рис. 103. Первичные ореолы вокруг слепого рудного тела (месторождение Ямансай, Таджикская ССР)

1—5 — рудовмещающие вулканогенные породы; 6 — разрывные нарушения (1) и рудное (2); 7, 8 — первичные ореолы (8 — поля повышенных содержаний); 9 — буровые скважины



установлены отчетливые аномалии всех элементов-индикаторов полиметаллического оруденения. В надрудных ореолах концентрированного оруденения (месторождение Ямансай; см. рис. 103) аномалии висмута, кобальта, молибдена и вольфрама (индикаторы подрудных ореолов) полностью отсутствуют.

2. В строении зон рассеянной минерализации отсутствует контрастная осевая зональность. Эта особенность строения аномалий, представленных зонами рассеянной минерализации, иллюстрируется рис. 105, как видно, по разрезу не выявлена сколько-нибудь заметная дифференциация в распределении надрудных и подрудных элементов. Возможность отличия зон рассеянной минерализации от ореолов промышленного оруденения по характеру геохимической зональности подтверждается данными соответствующих расчетов (табл. 22). Как следует из таблицы, изменение величины аддитивного коэффициента зональности на глубину более 150 м по существу не выходит за пределы точности расчетов.

Рис. 104. Моноэлементные и аддитивные ореолы вокруг слепого рудного тела
Усл. обозначения см. рис. 103

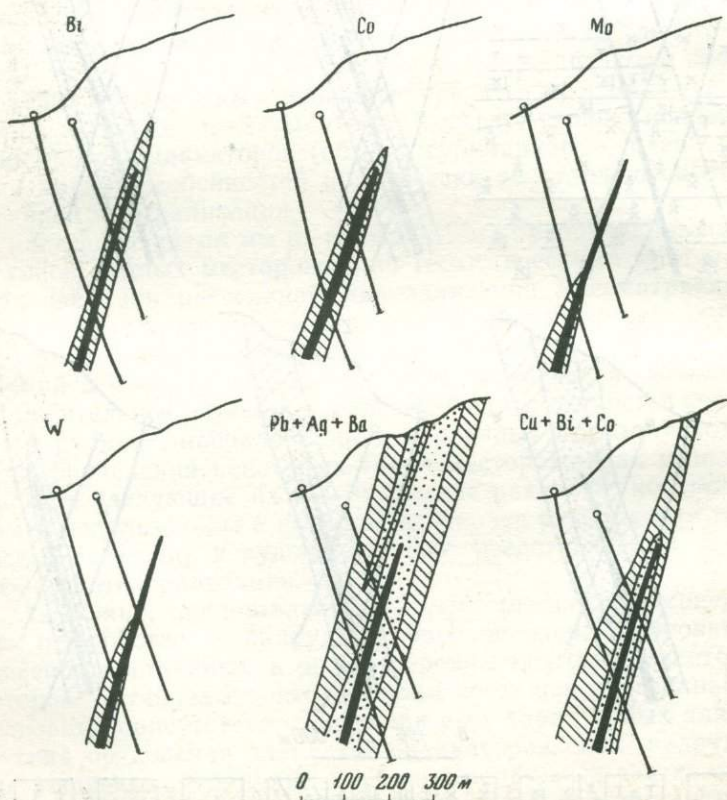
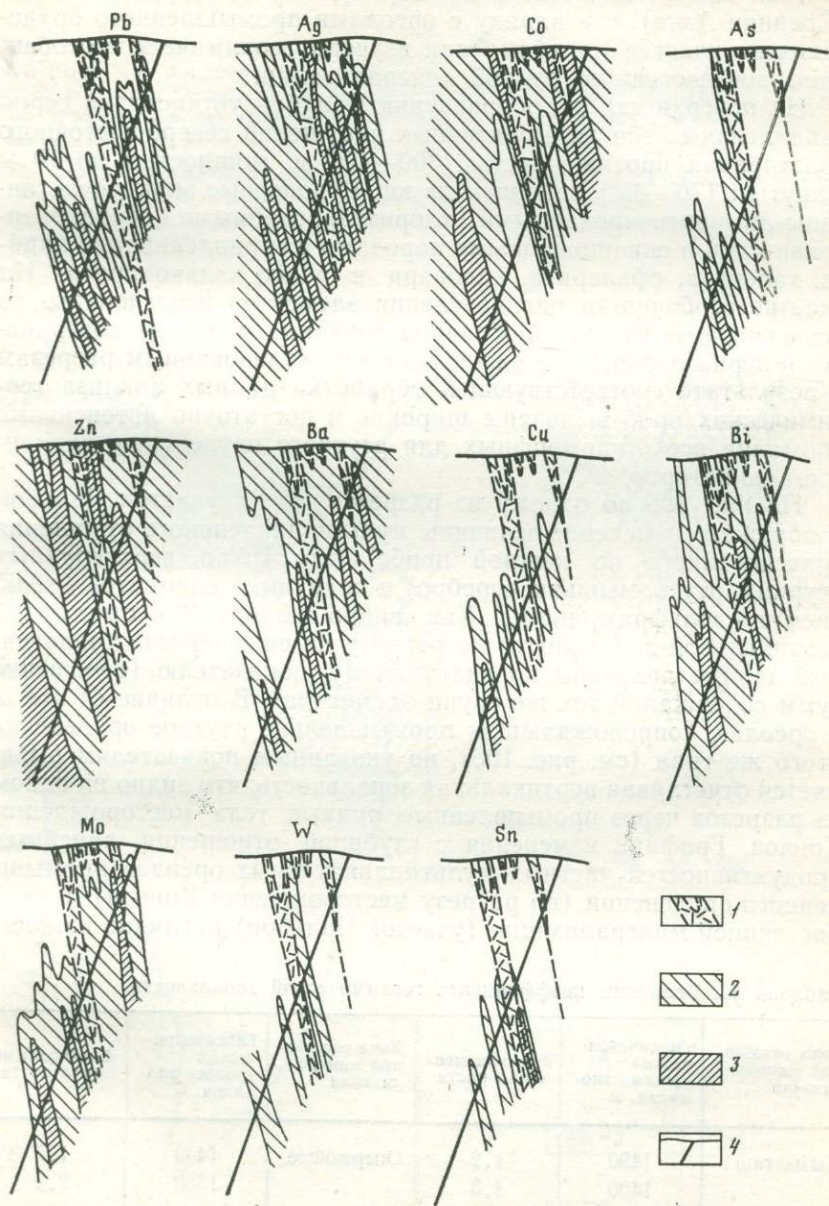


Рис. 105. Геохимические аномалии рудопроявления Кызылташ в разрезе, Центральный Кармазар

1 — зоны дробления; 2, 3 — геохимические аномалии (3 — поля повышенных содержания); 4 — буровая скважина



Картина, аналогичная рассмотренной выше, установлена и для месторождений других формаций и, в частности, ртутной, оловорудной, золоторудной и медноколчеданной. Ниже в качестве примера рассматриваются особенности зон рассеянной ртутной минерализации на примере Кончочского рудного поля (Средняя Азия), где наряду с ореолами промышленного оруденения на участке Чальбои были изучены геохимические особенности зон рассеянной рудной минерализации.

На поверхности рудопроявления Чальбои установлена серия параллельных зон дизъюнктивных нарушений северо-восточного простирания протяженностью 300—400 м, мощностью до 10 м с крутым (70—85°) падением на юг. Рудоносные зоны представлены лимонитизированными, хлоритизированными, серицитизированными и окварцованными породами с вкрапленностью пирита, галенита, сфалерита, киновари и редко халькопирита. На участке особенности распределения элементов исследованы по ряду разрезов путем опробования коренных пород на поверхности и керн буровых скважин. По всем исследованным разрезам в результате соответствующей обработки данных анализа геохимических проб выявлены широкие и достаточно интенсивные аномалии всех типоморфных для ртутного оруденения элементов-индикаторов.

На рис. 106 по одному из разрезов через участок Чальбои изображено изменение величины мультипликативного отношения (рассчитанного по каждой пробе) для групп верхнерудных (сурьма, ртуть, мышьяк, серебро) и подрудных элементов (медь, висмут, вольфрам, цинк). Как видно из рис. 106, отчетливой вертикальной зональности по разрезу не выявляется. Аналогичные данные получены по аддитивному показателю (отношение сумм содержаний тех же групп элементов). В отличие от этого, в ореолах, сопровождающих промышленное ртутное оруденение этого же типа (см. рис. 106), по указанным показателям выявляется отчетливая вертикальная зональность, что видно на одном из разрезов через промышленные рудные тела месторождения Кончоч. Графики изменения с глубиной отношения линейных продуктивностей частных мультипликативных ореолов промышленного оруденения (по разрезу месторождения Кончоч) и зоны рассеянной минерализации (участок Чальбои) наглядно иллюст-

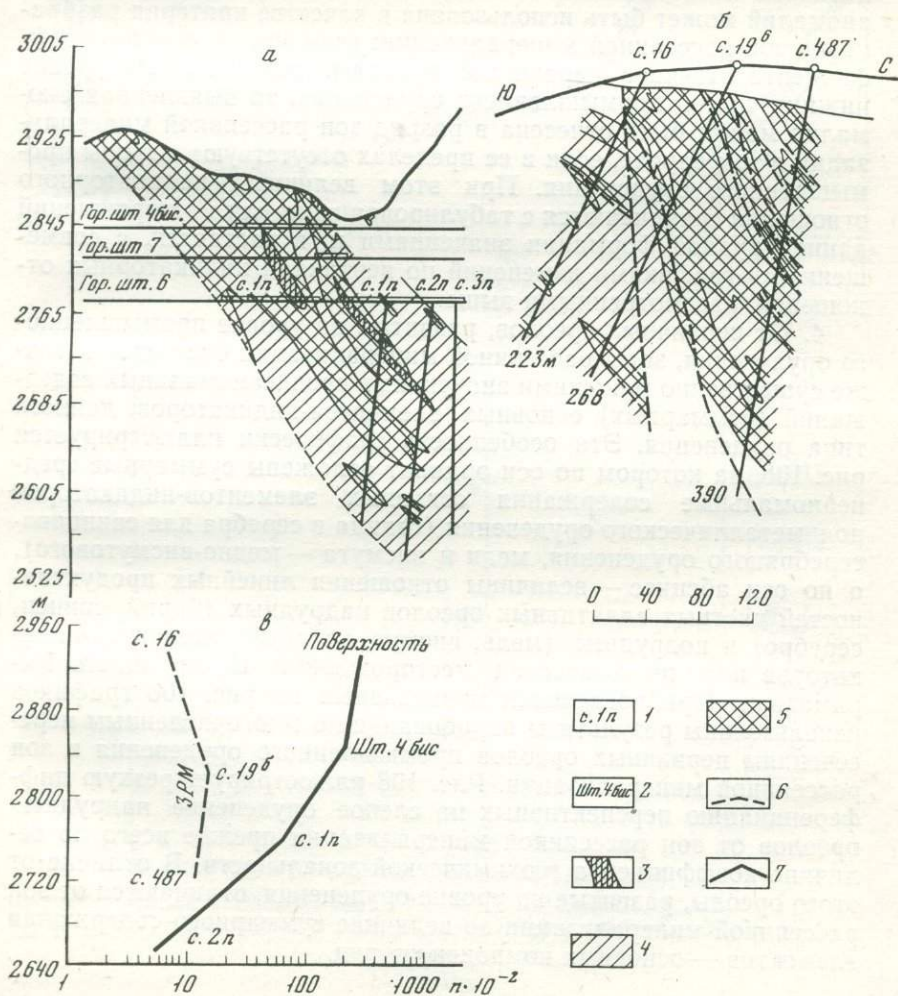
Таблица 22. Величины коэффициента геохимической зональности

Зона рассеянной минерализации	Гипсометрический уровень аномалии, м	Коэффициент зональности	Зона рассеянной минерализации	Гипсометрический уровень аномалии, м	Коэффициент зональности
Кзылташ	1490	1,2	Оперяющее	1450	1,7
	1400	1,3		1380	2,2
	1330	0,9			

рируют закономерность, установленную на примере полиметаллических месторождений: в строении ореолов промышленного оруденения выявляется контрастная вертикальная зональность (монотонно убывающий с глубиной график), практически отсутствующая в зоне рассеянной минерализации.

Рис. 106. Изменение величины мультипликативного показателя ($Sb \cdot Hg \cdot As \cdot Ag / Cu \cdot Bi \cdot W \cdot Zn$) по разрезам через слепое промышленное оруденение (а), через зону рассеянной ртутной минерализации (б) и графики изменения с глубиной мультипликативного коэффициента зональности (в); ртутное месторождение Кончоч

1 — буровые скважины; 2 — штольни; 3 — рудные тела; значения мультипликативного показателя: 4 — от 1 до 100 (а); от 0,0001 до 0,1 (б); 5 — более 100 (а), более 1 (б); 6 — график зоны рассеянной минерализации; 7 — график первичных ореолов промышленного оруденения



3. По величине коэффициента геохимической зональности (отношение параметров частных суммарных ореолов) любые срезы зон рассеянной рудной минерализации соответствуют ореолам, развитым на уровне нижних частей промышленного оруденения. Из-за отсутствия отчетливой зональности вариации величин коэффициента геохимической зональности в пределах зон рассеянной минерализации укладываются в сравнительно узкий интервал значений, который соответствует средней и нижней части промышленного оруденения. Это положение иллюстрируется рис. 107, на котором графики изменения с глубиной величин коэффициента зональности в ореолах промышленного оруденения и зон рассеянной минерализации пересекаются на уровне нижних частей промышленного оруденения. Это означает, что величина коэффициента геохимической зональности суммарных аномалий может быть использована в качестве критерия разбровки зон рассеянной минерализации: если значение этого коэффициента отвечает первичным ореолам, развитым на уровне нижних частей промышленного оруденения, то выявленная аномалия может быть отнесена в разряд зон рассеянной минерализации в том случае, если в ее пределах отсутствуют выходы промышленного оруденения. При этом величины индикаторного отношения сравниваются с табулированными для месторождений данной рудной формации значениями и, в частности, с совмещенными графиками изменений по вертикали индикаторных отношений, рассмотренными выше.

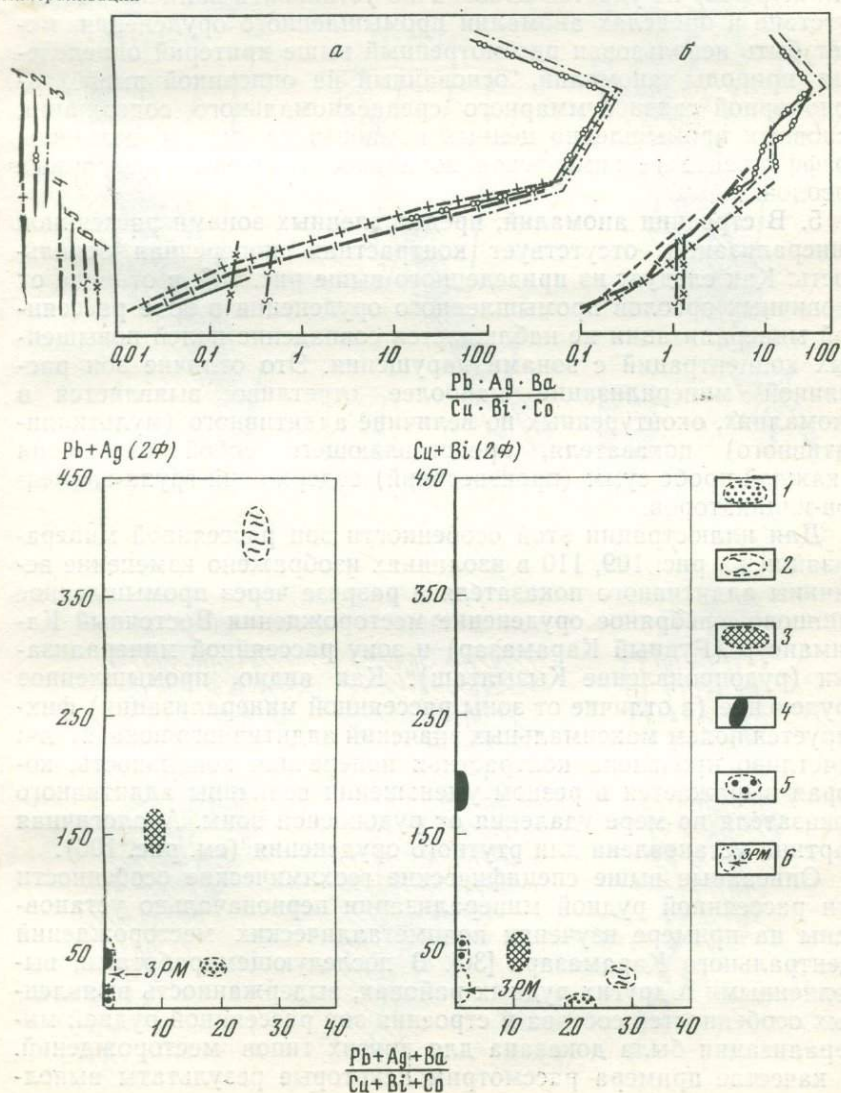
4. От первичных ореолов, развитых на уровне промышленного оруденения, зоны рассеянной минерализации отличаются также существенно меньшими значениями среднеаномальных содержаний (суммарных) основных элементов-индикаторов данного типа оруденения. Эта особенность графически иллюстрируется рис. 108, на котором по оси ординат отложены суммарные среднеаномальные содержания основных элементов-индикаторов полиметаллического оруденения (свинца и серебра для свинцово-серебряного оруденения, меди и висмута — медно-висмутowego), а по оси абсцисс — величины отношения линейных продуктивностей частных аддитивных ореолов надрудных (барий, свинец, серебро) и подрудных (медь, висмут, кобальт) элементов-индикаторов полиметаллических месторождений Центрального Кармазара. При построении приведенных на рис. 108 графиков использованы результаты опробования по многочисленным пересечениям первичных ореолов промышленного оруденения и зон рассеянной минерализации. Рис. 108 иллюстрирует резкую дифференциацию перспективных на слепое оруденение надрудных ореолов от зон рассеянной минерализации прежде всего по величине коэффициента геохимической зональности. В отличие от этого ореолы, развитые на уровне оруденения, отличаются от зон рассеянной минерализации по величине суммарного содержания элементов — основных компонентов руд.

Рис. 107. Совмещенные графики отношений линейных продуктивностей мультипликативных (а) и аддитивных (б) аномалий промышленного оруденения и зон рассеянной минерализации

1 — Канимансур; 2 — Северо-Западное; 3 — Ямансай; 4 — Тарыэкан; 5 — Каптархона; 6 — Кызылташ; 7 — Оперяющее

Рис. 108. Зависимость суммарных среднеаномальных содержаний основных компонентов руд и величин отношений линейных продуктивностей ореолов (по Р. Г. Оганесяну)

1 — надрудная часть полиметаллического оруденения; 2 — верхняя околорудная часть полиметаллического оруденения; 3 — нижняя и подрудная части полиметаллического оруденения; 4 — верхняя околорудная часть медно-висмутового оруденения; 5 — нижняя и подрудная части медно-висмутового оруденения; 6 — зоны рассеянной рудной минерализации



Практическое значение этого критерия определяется сложностью идентификации в определенных условиях рудных уровней первичных ореолов. Как уже отмечалось, отсутствие в пределах исследованной аномалии выходов концентрированного оруденения (при величине коэффициента зональности, отвечающей уровню промышленного оруденения) должно рассматриваться как вероятный признак рассеянной природы выявленной аномалии. В тех случаях, когда из-за недостаточной обнаженности участков исследований (или когда закрытые более молодыми отложениями аномалии выявлены редкой сетью картировочных скважин или шурфов) не удастся однозначно установить наличие или отсутствие в пределах аномалии промышленного оруденения, может быть использован рассмотренный выше критерий определения природы аномалий, основанный на описанной выше закономерной связи суммарного среднеаномального содержания основных промышленно ценных компонентов руд и величины коэффициента геохимической зональности частных суммарных ореолов.

5. В строении аномалий, представленных зонами рассеянной минерализации, отсутствует контрастная поперечная зональность. Как следует из приведенного выше рис. 105, в отличие от первичных ореолов промышленного оруденения в зоне рассеянной минерализации не наблюдается совпадение полей повышенных концентраций с зонами нарушения. Это отличие зон рассеянной минерализации наиболее отчетливо выявляется в аномалиях, оконтуренных по величине аддитивного (мультипликативного) показателя, представляющего собой отношения в каждой пробе сумм (произведений) содержаний групп элементов-индикаторов.

Для иллюстрации этой особенности зон рассеянной минерализации на рис. 109, 110 в изолиниях изображено изменение величины аддитивного показателя в разрезе через промышленное свинцово-серебряное оруденение месторождения Восточный Канимансур (Рудный Кармазар) и зону рассеянной минерализации (рудопроявление Кызылташ). Как видно, промышленное оруденение (в отличие от зоны рассеянной минерализации) фиксируется полем максимальных значений аддитивного показателя: отчетливо проявлена контрастная поперечная зональность, которая выражается в резком уменьшении величины аддитивного показателя по мере удаления от рудоносной зоны. Аналогичная картина установлена для ртутного оруденения (см. рис. 106).

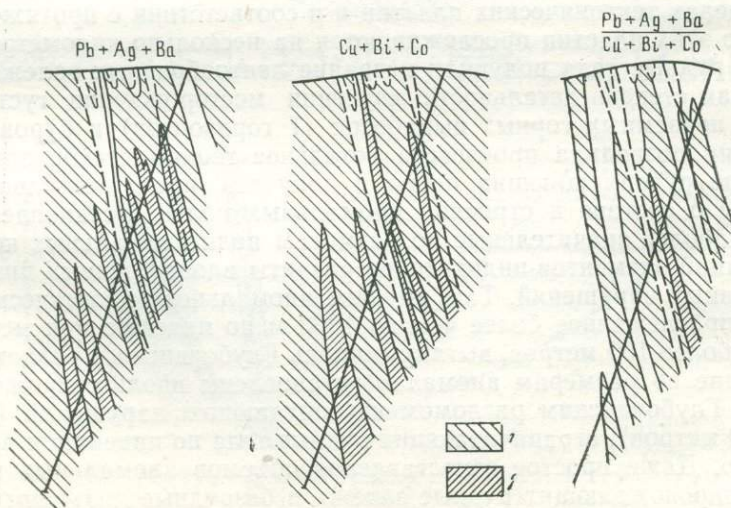
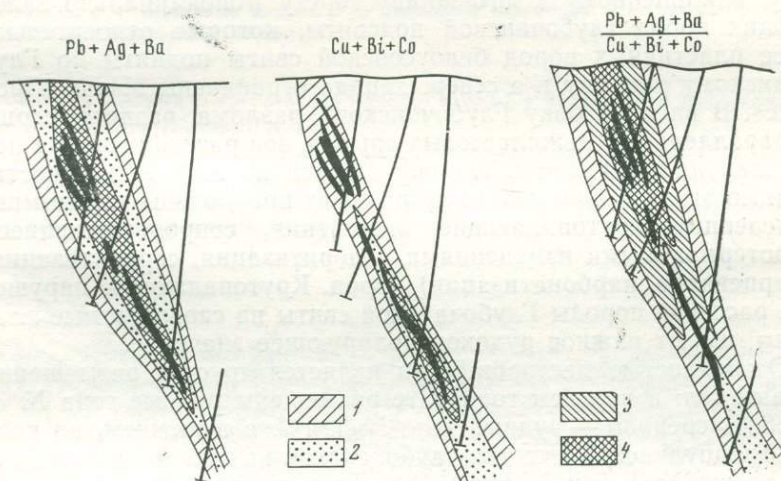
Описанные выше специфические геохимические особенности зон рассеянной рудной минерализации первоначально установлены на примере изучения полиметаллических месторождений Центрального Кармазара [30]. В последующем работами, выполненными в других рудных районах, выдержанность выявленных особенностей состава и строения зон рассеянной рудной минерализации была доказана для других типов месторождений. В качестве примера рассмотрим некоторые результаты выпол-

Рис. 109. Частные аддитивные ореолы и изменение аддитивного показателя (поперечный разрез месторождения В. Канмансур, по Р. Г. Оганесяну)

1—4 — поля аддитивных ореолов различной интенсивности (4 — поля максимальных интенсивностей). Значения аддитивного показателя: 1 — 0,1—1,0; 2 — 1,0—3,0; 3 — 3,0—10; 4 — более 10

Рис. 110. Частные аддитивные ореолы рассеянной минерализации и изменение аддитивного показателя (поперечный разрез рудопоявления Кызылташ, по Р. Г. Оганесяну)

1, 2 — поля аномальных значений (2 — поля повышенных значений)



ненного Г. Л. Рубо [69] изучения особенностей зон рассеянной минерализации на Белоусовском месторождении (Рудный Алтай). Район месторождения расположен в северо-восточной части Иртышской зоны смятия, в месте пересечения последней одной из ветвей Лениногорско-Семипалатинской зоны глубинных разломов и сложен нижнепалеозойскими метаморфическими сланцами, вулканогенно-осадочными образованиями среднего и верхнего палеозоя, герцинскими интрузивными породами нескольких комплексов и кайнозойскими отложениями. В структурном отношении Белоусовское месторождение приурочено к своеобразному, наклоненному к юго-западу горсту моноклинально залегающих пород глубочанской подсвиты, которые относительно более пластичных пород белоусовской свиты подняты по Глубочанскому разрыву и с северо-запада ограничены зоной «Прогресс». В висячем боку Глубочанского разлома развита серия субпараллельных межпластовых срывов, зон рассланцевания пород шипулинской свиты, проявляющихся по всей ее мощности. Помимо этого, к описываемому разрыву приурочены также многочисленные крутопадающие нарушения, сопровождающиеся гидротермальными изменениями (хлоритизация, серицитизация, окварцевание, карбонатизация) пород. Крутопадающие нарушения, рассекая породы Глубочанской свиты на своеобразные пластины, имеют важное рудоконтролирующее значение.

Особенностью месторождения является ярусное размещение рудных тел: в верхнем горизонте размещены рудные тела № 3, 7 и 8. В среднем — рудные тела № 1 и 2, а в нижнем, на контакте шипулинской свиты и глубочанской подсвиты размещаются залежи № 4, 5 и 6 (рис. 111). Лишь залежи № 3, 7 и установленная в последнее время № 8 локализируются непосредственно в породах глубочанской подсвиты вблизи (но не в самой!) зоны «Прогресс». Рудные тела месторождения локализованы в пределах тектонических пластин и в соответствии с протяженностью этих пластин прослеживаются на несколько километров. Такие рудные тела получили название лентообразных залежей. Высокая степень детальности изучения месторождения густой сетью подземных горных выработок (7 горизонтов) и буровых скважин позволила произвести детальное геохимическое опробование рудовмещающих пород и получить представительные данные о составе и строении аномальных полей. Установлено, что наиболее значительные по размерам поля аномальных концентраций элементов-индикаторов развиты вдоль главных дизъюнктивных нарушений. Так, крупное аномальное геохимическое поле, прослеженное более чем на 1000 м по падению при мощности более 100 метров, вытянуто вдоль Глубочанского разлома. Меньшие по размерам аномалии установлены вдоль сопряженных с Глубочанским разломом крутопадающих нарушений (до 20—40 метров), ограничивающих рудные тела по падению и востоку. Даже простое сопоставление объемов аномальных полей, сопровождающих рудные залежи и безрудные дизъюнктив-

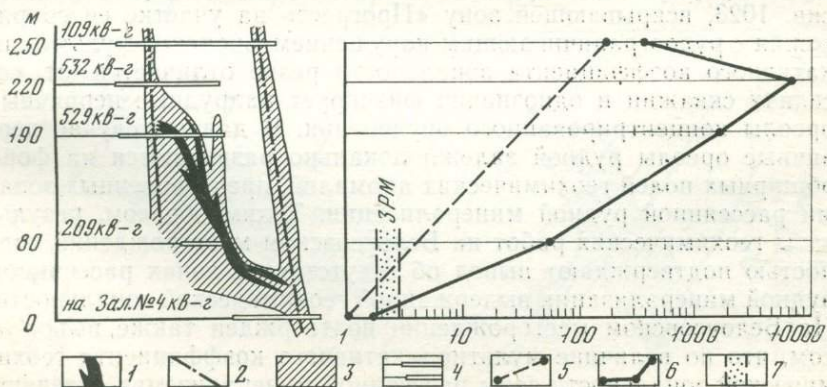
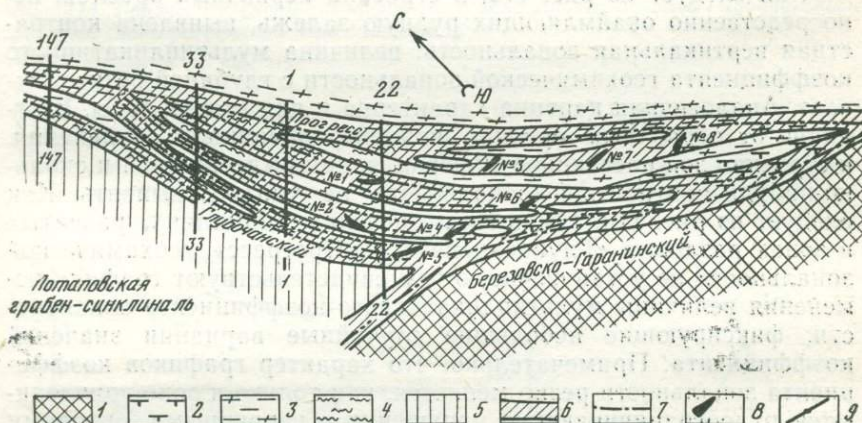
ные нарушения, однозначно показывает, что доля первичных ореолов концентрированного оруденения в общем объеме аномального геохимического поля Белоусовского месторождения в плане (схема, по Г. Л. Рубо)

Рис. 111. Морфология аномального геохимического поля Белоусовского месторождения в плане (схема, по Г. Л. Рубо)

Свиты: 1 — орловская, 2 — шипулинская, 3 — иртышская, 4 — белоусовская, 5 — потаповская, 6 — первичные ореолы, 7 — разрывные нарушения, 8 — рудные тела, 9 — геологические профили и их номера

Рис. 112. Графики мультипликативного коэффициента геохимической зональности (Pb·Ag·Zn/Cu·Co·Mo) по разрезу через 5-е рудное тело Белоусовского месторождения (Рудный Алтай)

1 — рудное тело; 2 — разрывные нарушения; 3 — первичный ореол (комплекс элементов-индикаторов); 4 — подземные горные выработки; 5, 6 — графики мультипликативного коэффициента по обоим аномальным полям (5 — поле, включающее рудное тело); 7 — зона рассеянной минерализации



лизации от первичных ореолов концентрированного оруденения. Детальное изучение особенностей развития первичных ореолов рудных залежей Белоусовского месторождения позволило установить, что геохимическая зональность первичных ореолов наиболее контрастно проявляется в строении частных мультипликативных ореолов надрудных (свинец, серебро, цинк) и подрудных (медь, кобальт, молибден) элементов. На рис. 112 в вертикальном поперечном разрезе изображены поля повышенных содержаний элементов-индикаторов в первичных ореолах вокруг рудной залежи № 5. Как следует из рис. 112, первичные ореолы отчетливо трассируют оба ограничивающих оруденение крутопадающих нарушения, при этом квершлаг 109 вскрывает оба рудоограничивающих нарушения: первое из них ограничивает рудное тело по его восстанию (50 м выше оруденения), а второе — нарушение ограничивает рудную залежь по ее падению. Кваршлагом 109 это нарушение и сопровождающая его зона геохимической аномалии вскрыты в 250 м выше нижнего окончания рудной залежи (см. рис. 112).

Как следует из рис. 112, в строении первичных ореолов, непосредственно окаймляющая рудную залежь, выявлена контрастная вертикальная зональность: величина мультипликативного коэффициента геохимической зональности с глубиной резко убывает. Аналогичная картина характерна и для второй зоны. В отличие от первичных ореолов концентрированного оруденения, в строении зон рассеянной минерализации выдержанной и сколько-нибудь контрастной зональности не удалось выявить. Как следует из рис. 113, 114, в геохимических аномалиях, развитых в зонах разломов «Глубочанский» и «Прогресс», геохимической зональности не установлено, о чем свидетельствуют графики изменения величины мультипликативного коэффициента зональности, фиксирующие небольшие случайные вариации значений коэффициента. Примечательно, что характер графиков коэффициента зональности резко меняется, как только к зоне прилегают рудоограничивающие нарушения с первичными ореолами концентрированного оруденения. Как следует из рис. 115, по скв. 1023, вскрывающей зону «Прогресс» на участке ее сопряжения с рудоограничивающим нарушением, значение мультипликативного коэффициента зональности резко отличается от соседних скважин и однозначно фиксирует надрудные первичные ореолы концентрированного оруденения. В данном случае первичные ореолы рудной залежи локально развиваются на фоне обширных полей геохимических аномалий, представленных зонами рассеянной рудной минерализации. Таким образом, результаты геохимических работ на Белоусовском месторождении полностью подтверждают вывод об отсутствии в зонах рассеянной рудной минерализации выдержанной геохимической зональности. На Белоусовском месторождении подтвержден также вывод о том, что по величине мультипликативного коэффициента геохимической зональности зоны рассеянной минерализации отвечают

Рис. 113. Геохимическая аномалия по зоне Глубочанского разлома (зона рассеянной минерализации)

- 1 — разрывные нарушения;
 2 — геохимическая аномалия (комплекса элементов-индикаторов);
 3 — буровые скважины;
 4 — график мультипликативного коэффициента геохимической зональности

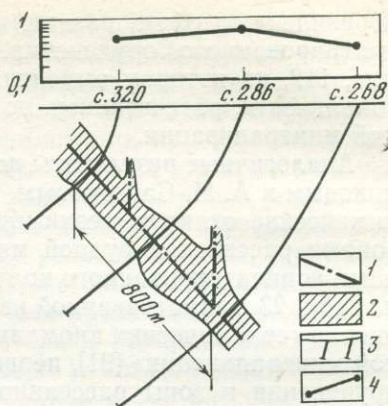
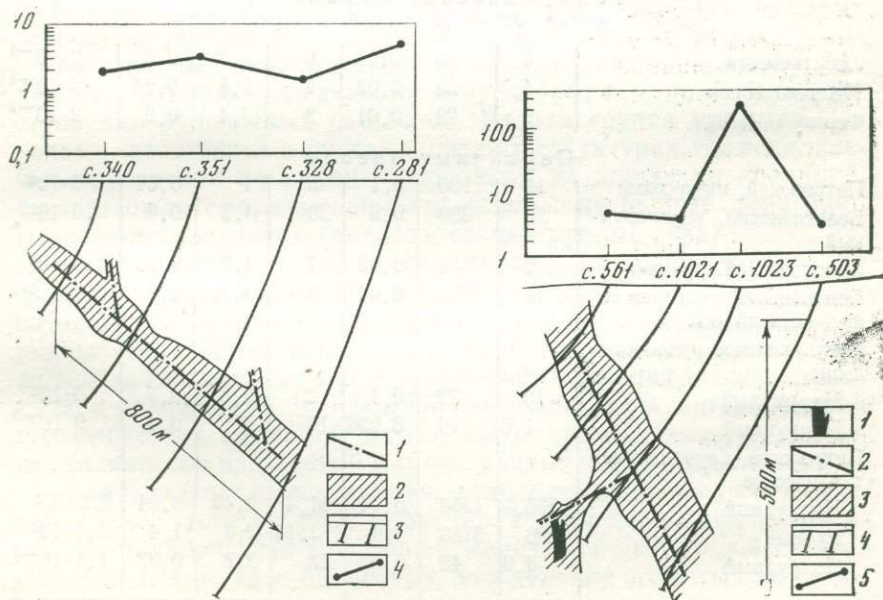


Рис. 114. График изменения коэффициента зональности по зоне Глубочанского разлома (зона рассеянной минерализации)

Усл. обозначения см. рис. 113

Рис. 115. Геохимические аномалии по зоне «Прогресс» (зона рассеянной минерализации) и сопряженному рудоконтролирующему нарушению

- 1 — рудная залежь; 2 — разрывные нарушения; 3 — геохимическая аномалия (комплекса элементов-индикаторов); 4 — буровые скважины; 5 — график мультипликативного коэффициента геохимической зональности



первичным ореолам, развитым на уровне корневых частей концентрированного оруденения. Это положение иллюстрируется рис. 112, на котором выделена область значений коэффициента зональности, рассчитанных по пересечениям через зоны рассеянной минерализации.

Аналогичные результаты получены Г. И. Хориным, И. Ф. Мясниковым и А. Н. Сайгаковым, изучавшими на Рудном Алтае геохимические отличия геохимических аномалий, представленных зонами рассеянной рудной минерализации и первичными ореолами концентрированного колчеданного оруденения. Как следует из табл. 23, заимствованной из работы указанных авторов «Опыт оценки геохимических аномалий, обусловленных зонами рассеянной минерализации» [91], первичные ореолы концентрированного оруденения и зоны рассеянной минерализации отчетливо дифференцируются по величине мультипликативного коэффициента геохимической зональности.

Специальное изучение геохимических особенностей зон рассеянной рудной минерализации только начато и выполнено пока на примере ограниченного числа рудных месторождений; полиметаллических, золоторудных, ртутных, оловорудных и медно-

Таблица 23. Значения коэффициента зональности

Объекты и уровень ореола	Среднее содержание, г·10 ⁻³ %						Pb·Zn·Ag
	Pb	Zn	Ag	Cu	Co	Mo	Cu·Co·Mo
Геохимические аномалии, обусловленные зонами рассеянной минерализации							
Леонтьевская	5	25	0,01	8	1,3	0,6	2·10 ⁻¹
Ивочкин Ключ	4,5	20	0,02	7	2,8	0,25	3·10 ⁻¹
Ферма	5	20	0,01	8	3,4	0,2	2·10 ⁻¹
Первичные ореолы							
Петровский, надрудный	12	100	0,1	5	1	0,04	6·10 ²
Белоглинский, верхнерудный	20	800	0,2	20	1,2	0,5	2,6·10 ²
Леонтьевский, рудный	52	52	0,02	7	1,9	0,09	4,5·10 ²
Семеновское месторождение, всячий бок	11	230	0,04	3	0,5	0,1	6,7·10 ²
Аргунихинское рудопроявление							
Надрудный	10	90	0,1	2	0,3	0,3	5·10 ²
Подрудный	1,6	16	0,006	13	3	0,4	9·10 ⁻³
Петровское баритполиметаллическое							
Надрудный	506,5	1268	0,54	81,4	2,16	3,04	6,6·10 ²
Рудный	1690	3183	1,6	1,14	2,5	1,4	2,1·10 ⁴
Подрудный	8,9	42	0,03	47	2,8	0,38	1,1·10 ⁻¹

колчеданных. По всем типам месторождений установлены единые геохимические особенности зон рассеянной рудной минерализации, что позволяет считать их характерными для эндогенного рудообразования в целом и использовать в качестве критериев разбраковки зон рассеянной минерализации при геохимических поисках рудных месторождений. Тем не менее эти критерии, выявленные на примере изучения ограниченного числа месторождений, должны быть использованы с известной осторожностью, с обязательным учетом конкретных условий и после апробации для новых типов месторождений. В настоящее время мы не располагаем данными, достаточными для представительной оценки эффективности использования критериев разбраковки зон рассеянной минерализации при поисковых работах. Имеются только некоторые примеры успешной разбраковки зон рассеянной рудной минерализации в Рудном Кармазаре и ряде других районов, которые свидетельствуют о высокой эффективности использования рассмотренных выше геохимических критериев при интерпретации результатов геохимического опробования.

Отметим, что зоны рассеянной рудной минерализации изучены чрезвычайно слабо, и поэтому в настоящее время мы еще не располагаем достаточными данными о геологоструктурных особенностях этих образований. Имеющиеся большей частью фрагментарные данные позволяют сделать только ряд общих замечаний о геологической природе зон рассеянной рудной минерализации. Представляется очевидным, что зоны рассеянной рудной минерализации в основном развиваются по системе дизъюнктивных нарушений в результате циркуляции по ним рудоносных растворов. Следует выделить следующие две основные группы зон рассеянной минерализации. К первой группе мы относим зоны рассеянной минерализации, развитые по рудоподводящим и рудораспределяющим структурам, т. е. по каналам поступления рудоносных растворов. Вторая группа представлена зонами, развитыми в рудовмещающих структурах, где локализация оруденения по каким-то причинам не дошла до кондиций, т. е. не были сформированы промышленные рудные тела промышленного значения («недоразвитые» рудные тела).

Следует отметить, что идентификация зон первой группы (по сравнению с разбравкой зон второй группы) представляет собой менее сложную задачу, поскольку зоны этой группы от рудных тел промышленного значения отличаются существенно не только геохимически, но и геологически (специфическое структурное положение). Это обычно позволяет при интерпретации геохимических аномалий производить альтернативную дифференциацию зон рассеянной минерализации первой группы и ореолы промышленного оруденения, используя как геохимические, так и геологоструктурные критерии. В отличие от этого, критерии разбраковки зон рассеянной минерализации второй группы менее надежны хотя бы потому, что деление развитых по рудовмещающим структурам геохимических аномалий на первичные

ореолы промышленного оруденения и зоны рассеянной минерализации в значительной степени условно, так как параметры рудных тел, определяющие их промышленную ценность, непостоянны: они меняются от месторождения к месторождению. Это обуславливает существование значительного диапазона комбинаций параметров рудных тел, в пределах которых как бы сосуществуют зоны рассеянной минерализации (второй группы) и промышленные рудные тела, т. е. в этом диапазоне параметров оруденения рудоносные зоны в одних случаях будут промышленными, в других — зонами рассеянной минерализации. При оценке геохимических аномалий этой переходной от промышленного оруденения к зонам рассеянной минерализации группы необходимы критерии не альтернативной оценки (зона рассеянной минерализации или промышленное оруденение), а количественной оценки, когда по параметрам геохимических аномалий определяются примерные масштабы прогнозируемого оруденения.

В заключение рассмотрения основных геохимических особенностей зон рассеянной рудной минерализации отметим, что геохимическое изучение этих образований резко отстало от работ по изучению особенностей состава и строения первичных ореолов промышленных рудных тел и месторождений. Такое одностороннее развитие работ, когда методические работы проводились только на крупных промышленных объектах, привело к разработке методики интерпретации геохимических аномалий, которая в настоящее время еще не является адекватной проблеме разбраковки зон рассеянной минерализации. Повсеместное распространение зон рассеянной минерализации обуславливает актуальность резкого расширения работ по детальному их изучению с целью совершенствования методики разбраковки геохимических аномалий, представленных зонами рассеянной рудной минерализации.

РАСШИФРОВКА ПОЛИФОРМАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ

В предыдущих разделах рассмотрены первичные ореолы, сопровождающие рудные тела и месторождения, сформированные вокруг рудных тел определенного состава в единый этап минерализации. Характерной чертой подобных ореолов является тесное совпадение в пространстве аномальных полей всех элементов-индикаторов данного типа оруденения, когда меньшие по размерам ореолы закономерно вписываются в контуры более широких, т. е. наблюдается согласное развитие ореолов различных элементов. Однако, как показывают исследования, иногда в результате совмещения в пространстве образований различных по составу и условиям локализации рудных месторождений формируются сложные по строению ореолы, названные «полиформационными» [30]. Полиформационные ореолы характеризуются специфическими корреляционными связями содержаний

элементов-индикаторов; между содержаниями элементов, типоморфных для разных рудных формаций, обычно устанавливается отрицательная корреляционная связь, тогда как в ореолах, связанных с одной рудной формацией, корреляционная связь обычно является существенно положительной.

Характерным примером развития полиформационных аномалий является вольфрам-молибденовое месторождение Тырнауз. Изучение геохимической зональности рудных тел и окаймляющих их первичных ореолов, выполненное Г. Я. Абрамсоном и С. В. Григоряном [1], показало, что на этом месторождении широко распространены полиформационные ореолы. Последние образуются как результат совмещения в пространстве продуктов по крайней мере двух этапов минерализации: скарново-шеелитового и кварц-молибденитового. Особенности развития полиформационных ореолов ниже рассматриваются на примере Северного участка месторождения. Промышленное оруденение на этом участке представлено двумя типами: кварц-молибденитовым и скарново-шеелитовым.

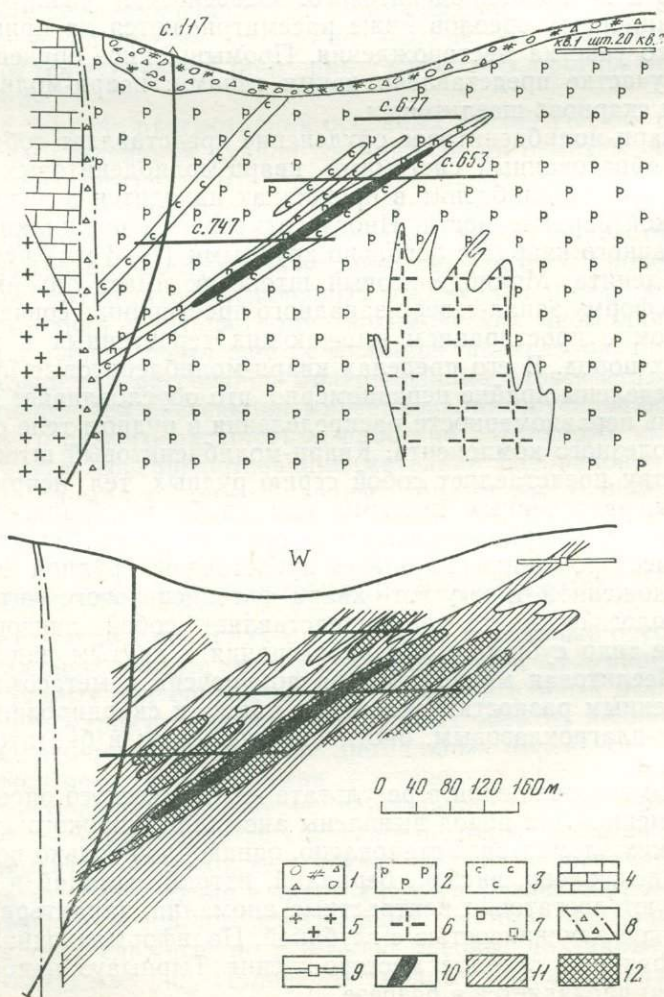
Кварц-молибденитовое оруденение представляет собой штокверк, образованный системами кварц-молибденитовых жил и прожилков. Молибденит в прожилках находится в виде чешуек и тонкой вкрапленности. Иногда отмечаются прожилки водяно-прозрачного кварца с довольно крупными (1—3 мм) чешуйками молибденита. Молибденитовый штокверк имеет линейно вытянутую форму запад-северо-западного простирания, совпадающую в целом с простиранием вмещающих терригенных и вулканогенных пород. В его пределах кварц-молибденитовые прожилки распределены крайне неравномерно, что обуславливает высокую степень неравномерности распределения в рудном теле содержания полезного компонента. Кварц-молибденитовый штокверк по существу представляет собой серию рудных тел неправильной формы, разделенных пустыми или слабо минерализованными участками. Скарново-шеелитовое оруденение на Северном участке месторождения Тырнауз представлено рудной зоной 69, расположенной к югу от кварц-молибденитового штокверка. Морфологически эта зона представляет собой линзоподобное рудное тело субширотного простирания с крутым падением на юг. Шеелитовая минерализация приурочена к метасоматически измененным разностям скарнов, а также к скарнированным пироксен-плаггиоклазовым, биотит-амфиболовым и биотитовым рогакам.

На месторождении в результате геохимического опробования рудовмещающих пород выявлены аномалии широкого круга химических элементов. Установлено, однако, что только вольфрам, молибден, олово, висмут, бериллий, иттрий, ванадий и мышьяк образуют достаточно контрастные аномалии, характеризующиеся резкой изменчивостью с глубиной. Полиформационная природа первичных ореолов месторождения Тырнауз наиболее отчетливо проявляется в разрезе.

Разрез I—I через рудную зону № 69. Как показали исследования, наиболее эффективными индикаторами скарново-шеелитового оруденения являются вольфрам, молибден, олово, висмут, бериллий, поэтому ниже рассматриваются ореолы только этих элементов. Вольфрам образует весьма широкие ореолы (более 200 м) вокруг рудного тела (рис. 116).

Рис. 116. Первичные ореолы вольфрама (разрез I—I через рудную зону № 69)

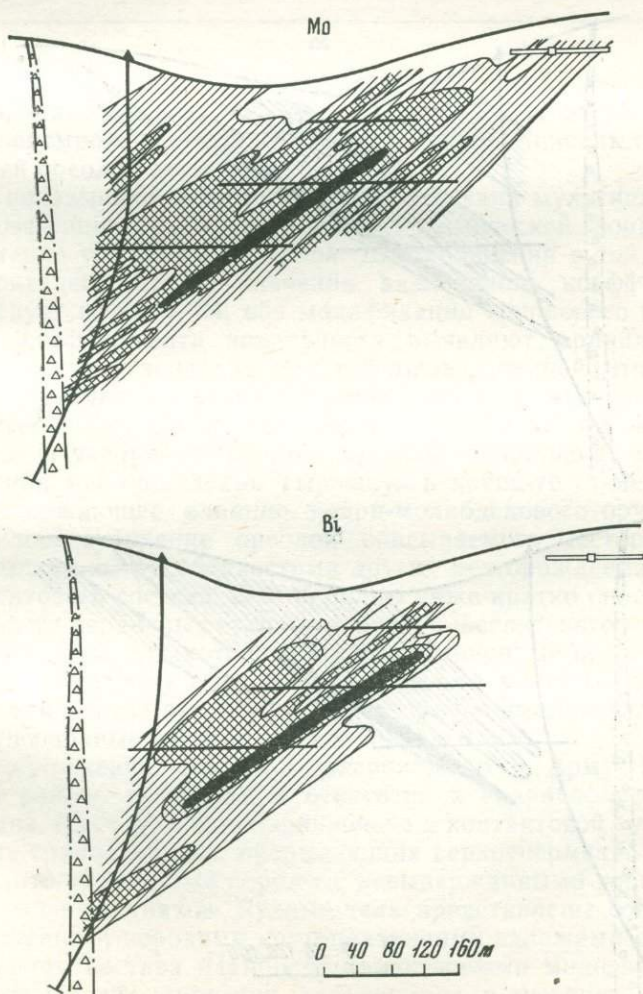
1 — четвертичные отложения; 2 — роговики биотитовые и биотит-амфиболовые; 3 — скарн; 4 — мраморы; 5 — гранит эльджуртинский; 6 — гранит лейкократовый; 7 — роговик пироксен-плагноклазовый; 8 — зона разлома; 9 — горные выработки и скважины; 10 — рудное тело; 11, 12 — первичные ореолы вольфрама (12 — поля повышенных содержаний)



Продуктивность ореола вольфрама значительно возрастает с глубиной. Молибден по описываемому разрезу также образует весьма широкие ореолы (рис. 117). Концентрация молибдена с глубиной возрастает, образуя максимум на горизонте шт. 18—19. Ниже этого уровня ореолы молибдена сужаются, а концентрация его в подрудной части уменьшается. Висмут на уровне нижних частей рудного тела образует весьма контрастные и широкие ореолы. Бериллий и олово образуют мощные надрудные шапки, которые с глубиной сужаются и к средней части руд-

Рис. 117. Первичные ореолы молибдена и висмута

Усл. обозначения см. рис. 116



ной зоны выклиниваются. В подрудной части околорудного пространства ореолы бериллия и олова отсутствуют (рис. 118).

Для выявления вертикальной зональности в строении первичных ореолов элементов-индикаторов скарново-шеелитового оруденения по описываемому разрезу рассчитаны величины показателя зональности элементов [30], позволившие составить следующий ряд (сверху вниз): бериллий — олово — висмут — вольфрам. Исходя из установленного ряда зональности, для оценки вертикальной зональности ореолов шеелит-молибденитового ору-

Рис. 118. Первичные ореолы олова и бериллия

Усл. обозначения см. рис. 116

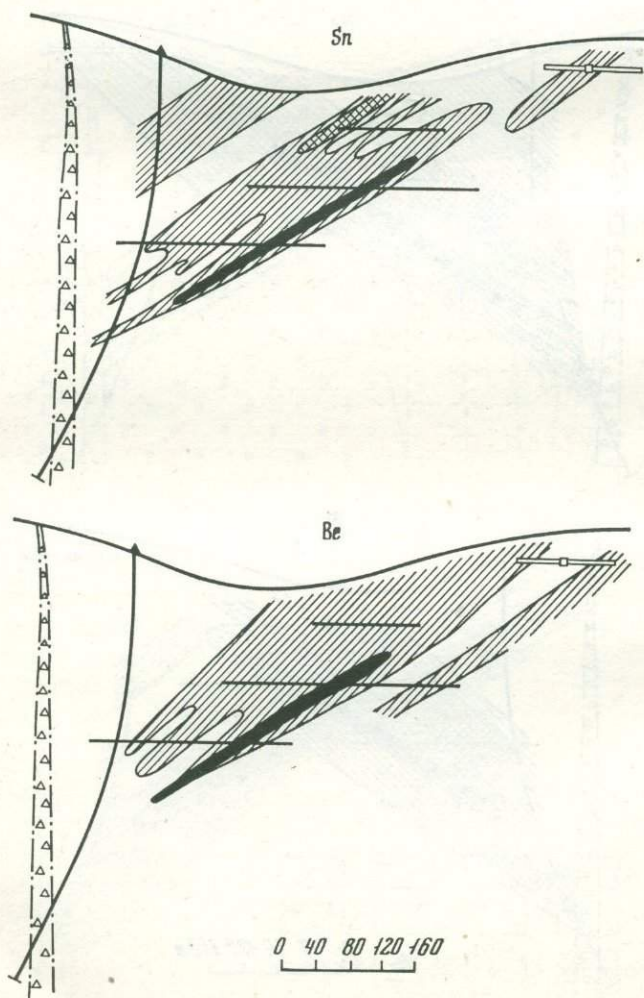


Таблица 24. Величина коэффициентов геохимической зональности ореолов скарново-шеелитового оруденения (разрез I—I)

Уровень сечения, м	Аддитивный коэффициент		Мультипликативный коэффициент	
		коэффициент контрастности I/V*		коэффициент контрастности I/V
I 2549,0	1,49	—	3,7	—
II 2470,6	0,64	—	4,4	—
III 2399,4	0,074	3634	0,005	9250
IV 2316,9	0,053	—	0,0024	—
V 2216,0	0,0004	—	0,0004	—

* Отношение величин коэффициентов верхнего (I) и нижнего (V) сечений разреза.

денения выбран следующий мультипликативный коэффициент: бериллий·олово/висмут·вольфрам. При подсчете этого коэффициента перемножению подвергались величины линейных продуктивностей ореолов элементов-индикаторов.

Как показывают данные табл. 24, величина мультипликативного коэффициента вертикальной геохимической зональности закономерно убывает с глубиной. Для сравнения в той же таблице приведены также значения аддитивного коэффициента. Как следует из табл. 24, обе модификации группового геохимического коэффициента зональности выявляют принципиально близкую картину зональности с той лишь разницей, что зональность в строении мультипликативных ореолов является более контрастной. Так как не исключено, что изложенные выше результаты изучения первичных ореолов скарново-шеелитового оруденения месторождения Тырнауз в какой-то степени отражают искажающее влияние кварц-молибденового оруденения, проводилось сравнение ореолов описываемого месторождения с геохимическими особенностями других месторождений скарново-шеелитового состава. С этой целью ниже кратко описываются особенности первичных ореолов скарново-шеелитового месторождения Восток-2, для которого полиформационные ореолы не характерны и поэтому его первичные ореолы могут быть использованы в качестве эталонных для скарново-шеелитового оруденения (первичные ореолы «чистой линии»).

Месторождение Восток-2 расположено в Арму-Иманском рудном районе Приморья и относится к скарново-шеелитовой формации. Месторождение приурочено к контактовой зоне штока меловых гранодиоритов, прорывающих верхнепермские песчано-алевролитно-кремнистые породы с невыдержанными горизонтами и линзами известняков. Рудные тела представлены согласными с вмещающими породами крутопадающими залежами скарново-шеелитового состава. Наиболее характерными минералами руд являются шеелит, пирротин, халькопирит, в меньших количествах

вах в рудах содержатся арсенопирит, пирит, висмутин, самородный висмут, галенит, сфалерит, сульфосоли свинца и меди, станин, касситерит.

На рис. 119 изображены первичные ореолы, изученные на вертикальном разрезе через главную рудную залежь месторождения Восток-2. Из многих элементов, образующих ореолы вокруг рудной залежи, наиболее широкие и контрастные ореолы вольфрама, висмута, олова и бериллия, т. е. элементов, являющихся основными индикаторами скарново-шеелитового оруденения на месторождении Тырнауз; ореолы вольфрама и висмута наиболее интенсивны на уровне нижних горизонтов. В отличие от этого, в ореолах олова и бериллия максимальная ширина и концентрация наблюдается в верхних частях околорудного пространства. Подсчет показателя зональности позволил установить, что, как и на месторождении Тырнауз, надрудными индикаторами являются бериллий и олово, а подрудными — висмут и вольфрам. Сравнение величин аддитивного и мультипликативного коэффициентов геохимической зональности показывает, что последний имеет более выдержанное изменение с глубиной и выявляет более контрастную зональность (табл. 25).

Рис. 119. Первичные ореолы элементов-индикаторов (разрез через месторождение Восток-2)

1 — гранит; 2 — терригенно-осадочные, метаморфизованные породы; 3 — скарны; 4 — скважины; 5 — рудное тело; 6, 7 — первичные ореолы (7 — поля повышенных содержания элементов)

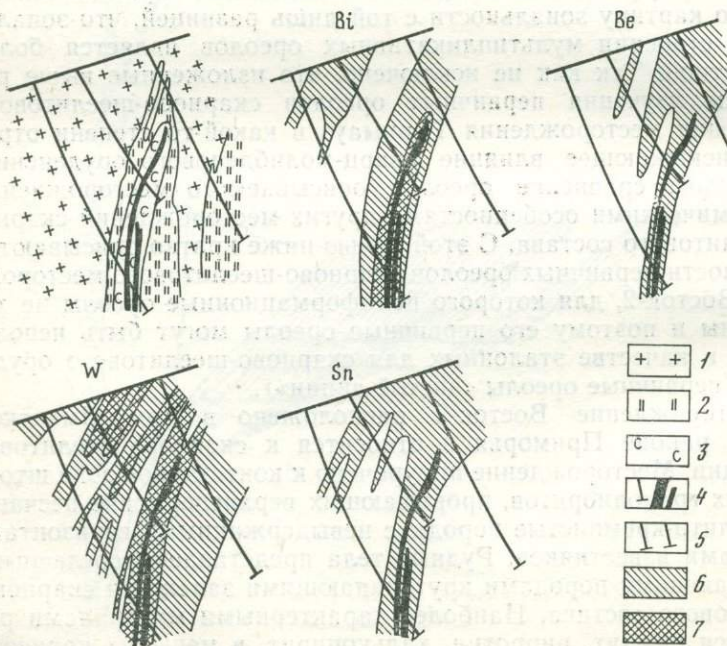


Таблица 25. Величины коэффициента геохимической зональности первичных ореолов месторождения Восток-2

№ сечения	Аддитивный коэффициент		Мультипликативный коэффициент	
	олово + бериллий		олово · бериллий	
	висмут + вольфрам		висмут · вольфрам	
I	0,31	0,06		
II	0,02	0,005		
III	0,01	0,0004		
Коэффициент контрастности	31	150		

Таблица 26. Величины мультипликативного коэффициента геохимической зональности первичных ореолов (разрез II—II)

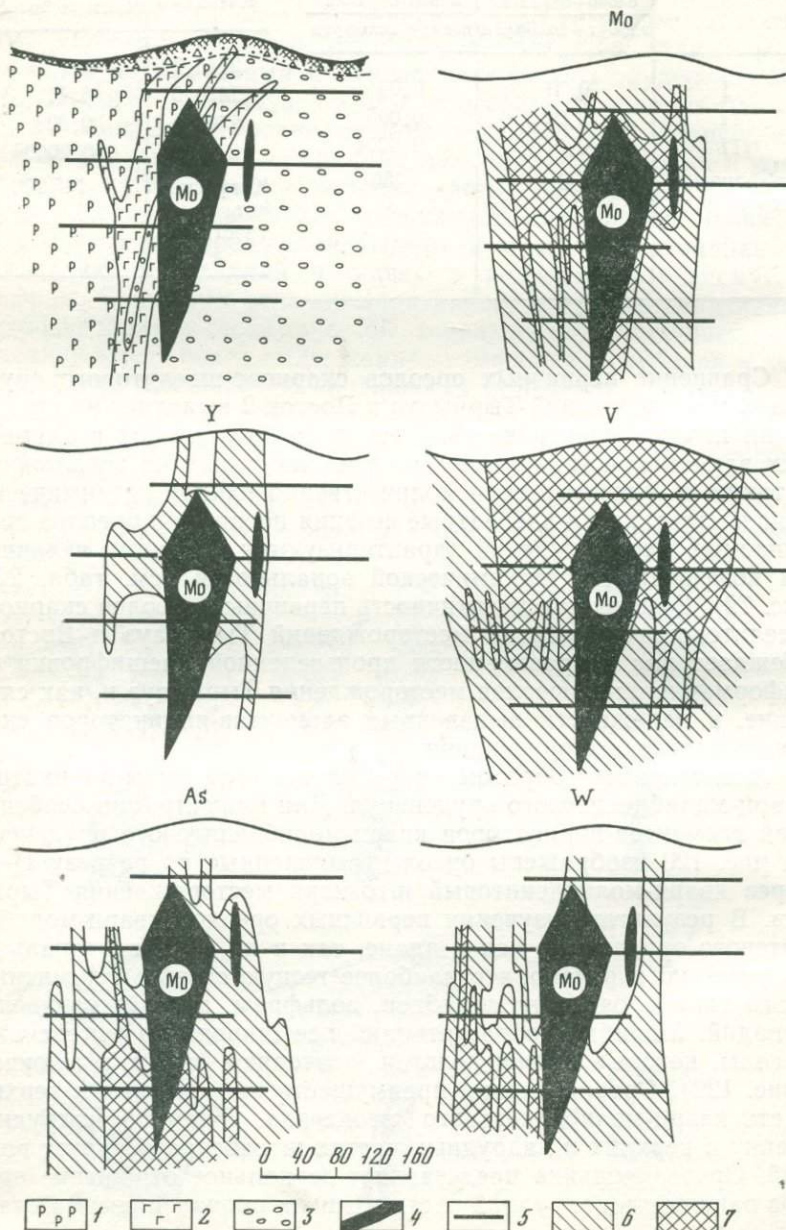
Уровень сечения, м	Ванадий · Иттрий	
	Мышьяк · Вольфрам	
2549,0	8,7	
2470,6	0,11	
2399,4	0,003	
2316,9	0,00006	
Коэффициент контрастности	145 000	

Сравнение первичных ореолов скарново-шеелитового оруденения месторождений Тырнауз и Восток-2 выявляет их практически полную идентичность. Последнее проявляется в одинаковых элементах-индикаторах, идентичных рядах их зональности, а также в существовании количественно единой геохимической зональности, когда адекватные сечения первичных ореолов сравниваемых месторождений характеризуются близкими величинами коэффициента геохимической зональности (см. табл. 25 и рис. 72). Отмеченная идентичность первичных ореолов скарново-шеелитового оруденения месторождений Тырнауз и Восток-2 убеждает нас в правильности произведенной расшифровки полиформационных ореолов месторождения Тырнауз и, как следствие, в надежности выявленных элементов-индикаторов скарново-шеелитового оруденения.

Аналогичным образом определены элементы-индикаторы кварц-молибденитового оруденения. Для иллюстрации особенностей элементов-индикаторов кварц-молибденитового оруденения на рис. 120 изображены ореолы, выявленные по разрезу II—II через кварц-молибденитовый штокверк месторождения Тырнауз. В результате изучения первичных ореолов кварц-молибденитового оруденения как в плане, так и по ряду вертикальных разрезов установлено, что наиболее тесную связь с оруденением этого типа проявляют молибден, вольфрам, иттрий, мышьяк и ванадий. Молибден образует наиболее широкие и интенсивные ореолы, которые по морфологии повторяют рудный штокверк (рис. 120). Ореолы иттрия преимущественно развиты в верхней части кварц-молибденитового штокверка. Мощную надрудную шапку в верхних и надрудных частях штокверка образует ванадий. Ореол мышьяка представляет зеркальное отражение ореолов ванадия: в надрудной части мышьяк проявлен весьма слабо.

Рис. 120. Распределение элементов-индикаторов в разрезе II—II через кварц-молибденитовый штокерк (месторождение Тырнауз)

1 — роговики; 2 — ультрабазиты; 3 — конгломераты; 4 — рудные тела; 5 — буровые скважины; 6, 7 — поля аномальных содержаний элементов (7 — поля повышенных содержаний)



С глубиной ширина его ореолов значительно возрастает, достигая максимальных значений в нижних частях разреза (см. рис. 120). В отличие от ореолов иттрия, ванадия и мышьяка, строение ореола вольфрама отчетливо отражает его полиформационную природу: кварц-молибденитовый штокверк окружен ореолом невысоких концентраций вольфрама. Поле повышенных концентраций этого элемента не совпадает с кварц-молибденитовым штокверком, а появляется южнее, что связано со скарново-шеелитовой залежью.

Для выяснения зонального строения ореолов кварц-молибденитового оруденения также рассчитаны величины показателя зональности элементов. Учитывая отмеченную выше полиформационную природу ореолов вольфрама, при расчетах показателя зональности из подсчетных контуров исключались поля высоких концентраций вольфрама, связанные со скарново-шеелитовым оруденением. Эти данные позволили составить следующий ряд зональности ореолов элементов-индикаторов кварц-молибденитового оруденения (сверху вниз): ванадий — иттрий — молибден — мышьяк — вольфрам. Это означало, что элементами-индикаторами для надрудных уровней ореолов кварц-молибденитового оруденения могут служить ванадий и иттрий, а для подрудных — мышьяк и вольфрам. Исходя из приведенного выше ряда, в качестве оценки вертикальной зональности ореолов кварц-молибденитового оруденения было выбрано следующее мультипликативное отношение линейных продуктивностей ореолов элементов-индикаторов: $\text{ванадий} \cdot \text{иттрий} / \text{мышьяк} \cdot \text{вольфрам}$.

Как видно из табл. 26, величина коэффициента монотонно и весьма контрастно убывает с глубиной. Таким образом, детальное изучение состава и строения полиформационных ореолов на месторождении Тырнауз позволило установить, что типоморфными только для скарново-шеелитового оруденения элементами-индикаторами являются висмут, олово и бериллий, для кварц-молибденитового — мышьяк, иттрий и ванадий. Отмечено, что дифференциация элементов по типам оруденения весьма четкая: ореолы олова, бериллия и висмута проявляют отчетливую приуроченность исключительно к скарново-шеелитовому оруденению, а иттрия, мышьяка и ванадия — кварц-молибденитовому штокверку. С целью более четкой дифференциации в пространстве ореолов элементов-индикаторов каждого из двух типов оруденения построены частные мультипликативные ореолы надрудных элементов, типоморфных для каждого из них. Для скарново-молибденитового оруденения такими являются бериллий и олово, а для кварц-молибденитового — иттрий и ванадий. Как следует из рис. 121, мультипликативные ореолы, по сравнению с моноэлементными, более контрастно дифференцируют различные типы оруденения, т. е. полиформационную природу первичных ореолов отражают более рельефно, особенно взаимные пересечения аномальных полей ореолов двух типов оруденения.

Выше отмечалось, что полиформационные ореолы характеризуются специфическими корреляционными связями между содержаниями элементов-индикаторов: между содержанием элементов, типоморфных для разных рудных формаций, обычно устанавливается отрицательная корреляционная связь, тогда как в ореолах, связанных с одной рудной формацией, корреляционная связь является существенно положительной [35]. Для иллюстрации этого положения в табл. 27 приведены величины коэффициента порядковой корреляции между содержаниями элементов в полиформационных ореолах, образовавшихся в результате частичного наложения оруденений двух типов (скарново-шеелитовой зоны № 69 и кварц-молибденитового штокверка). Приведенные выше примеры показывают, что, несмотря на значительные трудности расшифровки полиформационных ореолов, обычно удается выявить специфические для каждого из совмещенных типов оруденения элементы-индикаторы, которые с успехом могут быть использованы для расшифровки полиформационных аномалий с последующей оценкой перспектив рудоносности на тот или иной тип оруденения. Наряду с решением этой, в практическом отношении важной задачи разработка надежных критериев идентификации и последующей расшифровки полиформа-

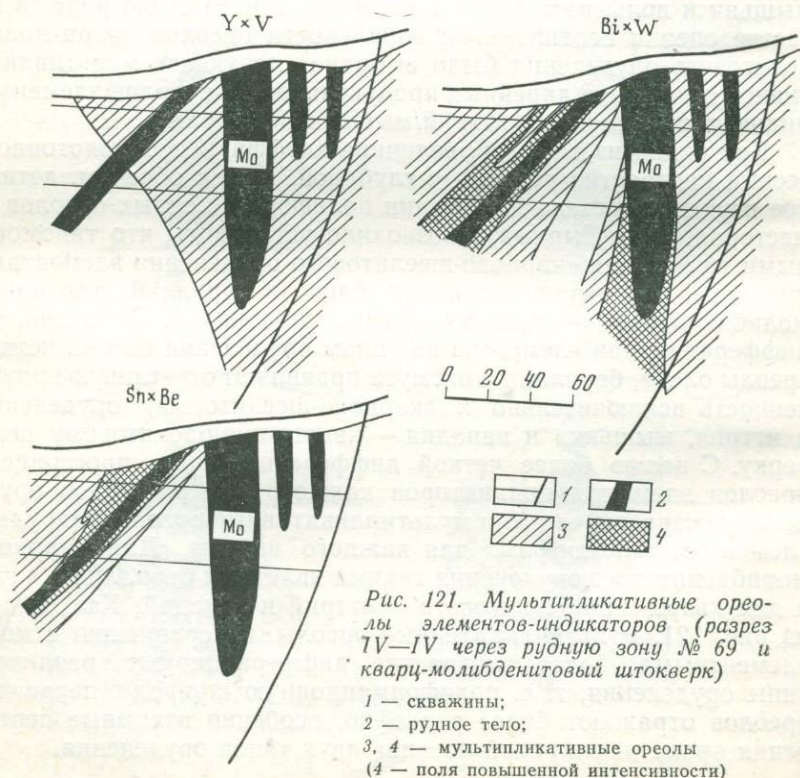


Таблица 27. Величины коэффициента ранговой корреляции

Пара элементов	Величина коэффициента корреляции	
Индикаторы одного типа оруденения	Олово — бериллий	+0,61*
	Ванадий — иттрий	+0,56
Индикаторы оруденения разных типов	Олово — ванадий	-0,001
	Бериллий — ванадий	-0,06
	Олово — иттрий	-0,12
	Бериллий — иттрий	-0,18

* Полужирным набраны значимые связи (с 1%-ным уровнем значимости).

ционных ореолов весьма актуальна еще и потому, что рассмотренный выше подробно критерий зональности первичных ореолов может быть использован только для оценки геохимических аномалий гомогенных, сопровождающий один тип оруденения, т. е. только после того, как уже произведена расшифровка полиформационных аномалий (или же доказана гомогенная природа выявленных аномалий).

Известно, что задача определения формационной принадлежности выявленных в том или ином районе геохимических аномалий обычно решается на основе металлогенических исследований района, а также структурно-минералогических наблюдений на исследуемом объекте. Часто встречаются полиформационные ореолы, образованные в результате полного или частичного наложения оруденений разных типов. Полиформационная природа таких геохимических аномалий может быть установлена по результатам геолого-минералогического исследования в тех случаях, когда рудные тела совмещенных в пространстве типов оруденения имеют выход на поверхность. В тех случаях, когда рудные тела, хотя бы одного типа оруденения, являются слепыми или же полностью уничтожены эрозией, распознавание полиформационной природы аномалий одними лишь геологическими наблюдениями чрезвычайно осложняется и в подобных, весьма распространенных, случаях решающее значение приобретают критерии, вытекающие из рассмотренных выше специфических особенностей развития полиформационных ореолов. Отметим, что изучение полиформационных ореолов только начато и поэтому рассмотренные выше критерии и в последующем должны быть существенно дополнены и уточнены.

ОЦЕНКА МАСШТАБА ОРУДЕНЕНИЯ

Оценка масштаба оруденения на глубину, отбраковка на этой основе обнаруженных минерализованных зон, прогноз наличия рудных тел в слепом залегании — представляют собой

одну из наиболее сложных, но и наиболее важных задач при разработке геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых. Широкое использование в практике геологоразведочных работ вертикальной зональности рудных тел и окружающих пород, гидрохимических и особенно литохимических методов анализа первичных ореолов рассеяния элементов вокруг рудных тел позволило значительно повысить эффективность поисково-разведочных работ и в ряде случаев ориентировочно оценивать масштаб нижележащего оруденения. В то же время в основе этих методов, как и любых других, лежат вполне конкретные предпосылки, сграницивающие их использование определенными рамками. Попытки применения обычных литохимических методов для оценки масштаба оруденения на глубину показывают, что хотя в отдельных случаях и удается установить зависимость между параметрами первичных ореолов и мощностью или продуктивностью рудных тел, но прогнозная ценность этой информации о более глубоких горизонтах месторождения

Рис. 122. Графики зависимости линейной продуктивности ореолов урана и свинца от мощности рудных тел

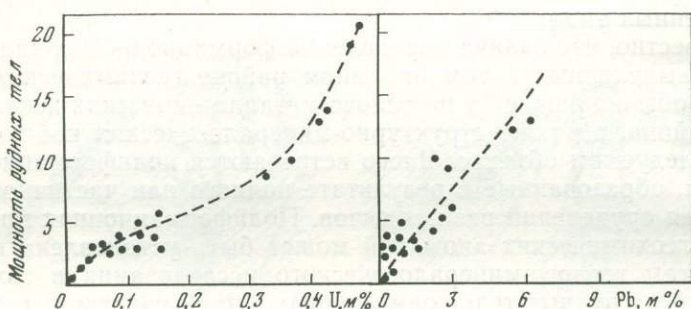
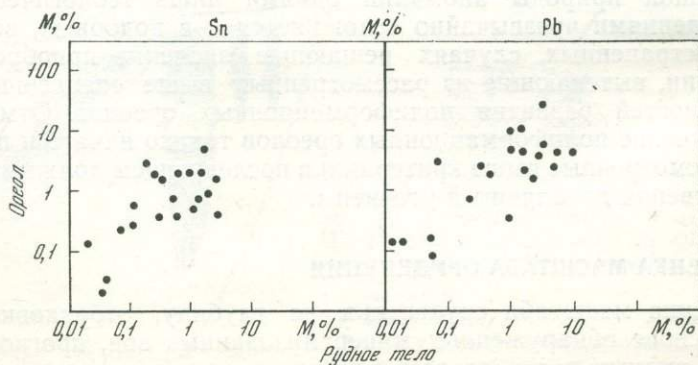


Рис. 123. Графики зависимости линейной продуктивности ореолов и рудных тел оловорудного месторождения Зимнее

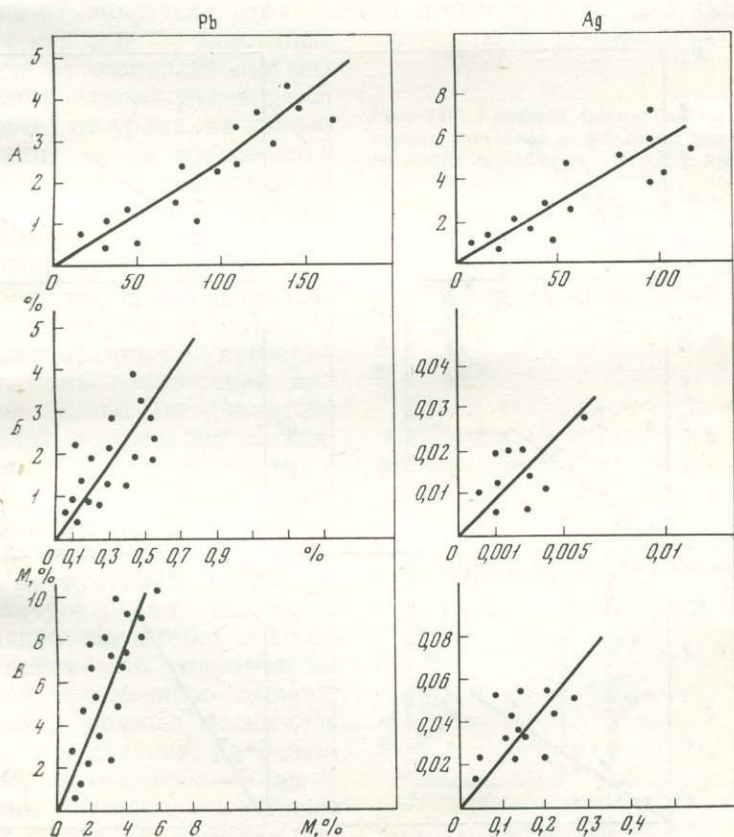


невелика. Проведенные исследования показывают, что в случае идентичности геологоструктурных условий локализации оруденений вокруг мощных рудных тел, как правило, образуются более широкие и протяженные ореолы. При этом наиболее тесная связь выявляется для ореолов элементов, являющихся основными промышленно ценными компонентами руд (уран — для урановых, олово — для оловорудных месторождений и т. д.). Для элементов-спутников эта связь ослабевает по причине их зонального распределения особенно заметно для элементов — характерных индикаторов надрудного уровня.

Прямая зависимость между мощностью рудных тел и линейной продуктивностью окаймляющих их ореолов урана иллюстрируется рис. 122, где каждая точка отражает соотношение мощ-

Рис. 124. Графики зависимости параметров ореолов и рудных тел полиметаллических месторождений Центрального Кармазара

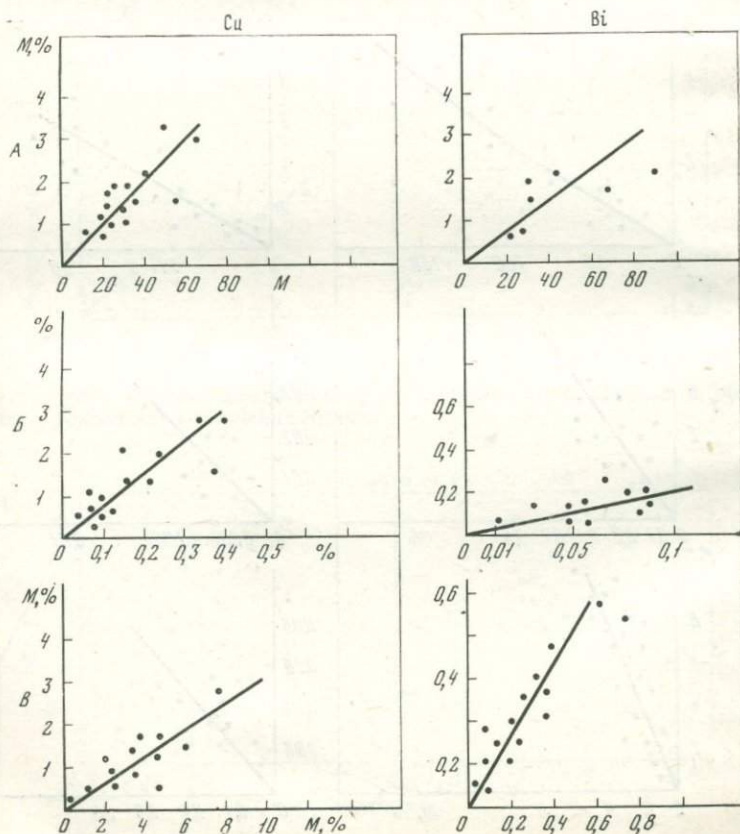
А — мощность рудных тел и ореолов; Б — среднее содержание элементов в рудных телах и ореолах; В — линейная продуктивность рудных тел и ореолов



ности рудного тела и линейной продуктивности ореола урана по одному линейному пересечению. Аналогичная закономерность установлена и для свинца — одного из основных элементов-спутников урана (см. рис. 122). Сравнение приведенных на рис. 122 графиков (для уранового месторождения в гранитах) выявляет несколько больший разброс точек наблюдений для свинца, что следует объяснить зональным строением ореолов этого элемента (свинец является индикатором надрудных сечений первичных ореолов урановых месторождений). Приведенные на рис. 123 графики иллюстрируют симбатную зависимость между продуктивностью рудных тел оловорудного месторождения Зимнее и окаймляющих их ореолов олова и свинца. Прямая связь параметров рудных тел полиметаллического (свинцово-серебряного) состава и первичных ореолов их основных элементов-индикато-

Рис. 125. Графики зависимости параметров ореолов и рудных тел медно-висмутовых месторождений Центрального Кармазара

Усл. обозначения см. рис. 124

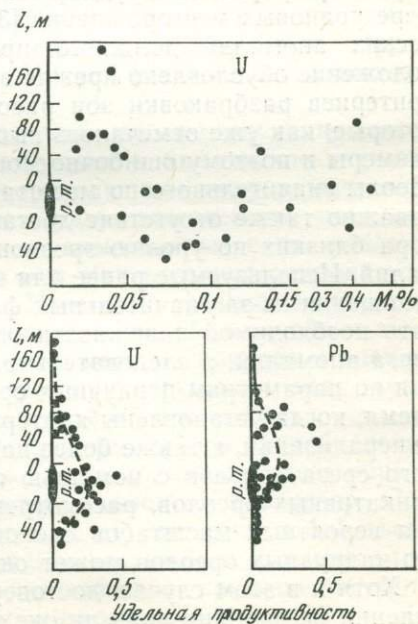


ров (свинца и серебра) установлена также на жильных полиметаллических (рис. 124) и медно-висмутовых месторождениях Центрального Карамазара (рис. 125).

Прямая зависимость параметров ореолов и рудных тел выявляется не только на уровне оруденения (рис. 122), но и для надрудных ореолов. На рис. 126 приведены графики изменения с глубиной величин линейных продуктивностей ореолов, развитых вокруг рудных тел уранового месторождения, залегающего в гранитах. На графиках каждая точка соответствует величине линейной продуктивности, рассчитанной по одному из горизонтальных сечений ореола. Как видно, верхний график рисунка представляет собой поле беспорядочно разбросанных точек. Картина существенно меняется при отложении по оси абсцисс не абсолютных величин линейной продуктивности ореолов, а относительных, рассчитанных как частное от деления величин абсолютных продуктивностей на мощность (максимальную) соответствующих рудных тел (удельная продуктивность). В этом случае точки закономерно расположены на линии, фиксирующей постепенное увеличение продуктивности ореола по мере приближения к рудному телу, отражая тем самым прямую зависимость продуктивности надрудных ореолов от мощности соответствующих слепых рудных тел. В отличие от урана, на графике свинца точки наблюдения характеризуются большим разбросом и резким сдвигом вверх, что является отражением вертикальной зональности (развитие интенсивных ореолов свинца выше рудных тел).

Рассмотренный критерий может быть использован при количественной интерпретации аномалий в пределах площадей, прилегающих к эталонному месторождению. Следует еще раз оговориться, что несмотря на отчетливую зависимость продуктивности ореолов от размеров рудных тел, задача оценки масштабов слепого оруденения по параметрам ореолов чрезвычайно сложна, поскольку, помимо масштабов слепого оруденения, на развитие первичных ореолов существенное влияние оказывают другие факторы, такие как гео-

Рис. 126. Графики изменения по вертикали линейной и удельной продуктивности первичных ореолов слепого оруденения



логоструктурные условия локализации оруденения, физико-механические свойства вмещающих пород и т. д. Тем не менее в пределах рудных районов, где на примере известных месторождений доказана рассмотренная выше закономерная связь параметров, ореолов и рудных тел, при выборе наиболее перспективных из однотипных надрудных аномалий предпочтение следует отдавать тем, которые характеризуются максимальной продуктивностью. Однотипными в данном случае считаются аномалии, связанные с одной и той же рудной формацией, характеризующиеся идентичными геологоструктурными условиями, близкими уровнями эрозионного среза и развитые в одних и тех же породах. Последнее условие особенно важно, поскольку интенсивность и размеры ореолов в определенной степени зависят также от типа вмещающих пород и в первую очередь от их физико-механических свойств: в породах повышенной пористости и трещиноватости развиваются более интенсивные и широкие ореолы, что обязательно должно быть учтено при оценке масштаба оруденения по параметрам.

Следует иметь в виду, что рассмотренный выше критерий количественной интерпретации геохимических аномалий, основанный на закономерной связи параметров рудных тел и ореолов, является не абсолютным, а относительным, и поэтому его использование может быть эффективным при интерпретации не единичных аномалий, а их групп, когда из ряда однотипных аномалий, признанных надрудными, выделяются наиболее перспективные. Отметим, что отмеченная выше прямая зависимость параметров ореолов и рудных тел, впервые установленная на примере урановых месторождений [30], при интерпретации геохимических аномалий должного применения не получила. Такое положение обусловлено прежде всего отсутствием геохимических критериев разбраковки зон рассеянной рудной минерализации, которые, как уже отмечалось выше, обычно имеют значительные размеры и поэтому ошибочно могли быть приняты за надрудные ореолы значительного по масштабам слепого оруденения. Немаловажно также отсутствие достаточно надежных критериев выбора близких по уровню эрозионного среза геохимических аномалий. Используемые ранее для этой цели парные индикаторные отношения из-за значительных флуктуаций не могли гарантировать необходимой надежности определения уровня эрозионного среза аномалий, а следовательно, и масштабов слепого оруденения по параметрам первичных ореолов. Вот почему в настоящее время, когда установлены критерии разбраковки зон рассеянной минерализации, а также более надежной оценки уровня эрозионного среза ореолов с помощью отношения параметров мультипликативных ореолов, рассмотренная выше методика определения вероятных масштабов слепого оруденения по параметрам его надрудных ореолов может оказаться более надежной.

Хотя и в этом случае, достоверность прогноза масштаба оруденения на глубину вряд ли окажется высокой. Дело в том, что

часто даже в пределах одного рудного поля встречаются рудные тела с разным характером распределения по вертикали рудных минералов. Например, на сульфидно-касситеритовых месторождениях Дальнего Востока вертикальная зональность в пределах рудных тел обычно выражается в преимущественном развитии сульфидного полиметаллического оруденения гипсометрически выше оловянного. Однако в том же рудном районе встречаются рудные тела, в которых развитие оловянного и полиметаллического оруденения не разделяется по вертикали, иногда преимущественное развитие полиметаллического оруденения отмечается на более низких гипсометрических уровнях, чем оловянное. Более того, олово не случайно занимает одно из последних мест в ряду рудных элементов по способности к образованию первичных ореолов вокруг рудных тел. Поэтому надрудные первичные ореолы рассеяния на оловянных месторождениях в основном слагаются не главным, а сопутствующими ему рудными элементами, фиксация которых в рудном теле не только оторвана во времени от отложения главного рудного компонента, но и никак количественно между собой не связана. Таким образом, использование описанных выше общепринятых путей решения задачи прогнозной оценки рудных зон на глубину и обнаружения слепых рудных тел не полностью обеспечивает надежного решения этой проблемы. Поэтому в плане решения этой сложнейшей задачи в последние годы ведущее значение приобрело создание геохимических методов разбраковки рудных зон и оценки масштаба оруденения на глубину, основанных на глубоком понимании физико-химической сущности процессов рудообразования, на расшифровке условий переноса и отложения рудного вещества, на раскрытии механизма действия и геохимических барьеров, на знании сопряженных химических реакций, вызывающих и сопровождающих рудоотложение.

Мы теперь знаем, что в сложных по составу природных растворах рудные компоненты вступают в химическое взаимодействие с целым рядом ионов, определяющих гидротермальный фон гидротермальных растворов, образуя комплексные соединения. Сейчас известно большое число комплексных ионов различных металлов, в форме которых они могут транспортироваться гидротермальными растворами. Известны физико-химические поля и условия их существования в растворе. Но важнейшее значение для разработки геохимических методов поисков и оценки месторождений имеет знание причин разрушения этих комплексных соединений и отложения рудного вещества.

Причем, говоря о причинах гидротермального рудообразования, мы не можем рассматривать их просто, как антитезу обратного явления — поступления рудных элементов в раствор. Общеизвестно, что причиной отложения из раствора любой твердой фазы, любого минерала является достижение концентраций слагающих его компонентов, обеспечивающих превышение соответствующего произведения растворимости. Но это причина об-

шая, которая справедлива вне зависимости от того, образуется ли при этом не представляющая никакого практического интереса редкая вкрапленность рудных минералов или крупные месторождения. Для образования практически ценных рудных тел нужно не просто осаждение из растворов рудных элементов, а концентрированное их отложение в ограниченных объемах. Следовательно, для наших целей первоначальное значение приобретает понимание причин локального фокусирования проявления общих химических факторов осаждения рудного вещества, причин возникновения на пути движения рудоносных растворов своего рода геохимических барьеров и механизма их действия.

Очевидно, что концентрированное осаждение из гидротермальных растворов рудного вещества может вызываться разными факторами. Еще совсем недавно универсальным и определяющим фактором рудоотложения считалась температура гидротермальных растворов, точнее ее снижение. Но чем дальше мы углубляемся в изучение этого вопроса, тем роль температуры, как ведущего фактора рудоотложения представляется все более ограниченной. У переносящих рудное вещество комплексных соединений нет резких температурных пиков растворимости. Более того, процесс рудообразования в пределах одной-двух стадий часто оказывается практически изотермичным на всем вертикальном интервале развития оруденения. Конечно, при многостадийном процессе рудообразования последовательное снижение температуры будет способствовать, например, смене окисных ассоциаций минералов сульфидными, благодаря повышению активности сульфид-иона, но даже в этом случае не температурный фактор оказывается главной причиной рудоотложения.

В последние годы много внимания уделялось также связыванию или удалению с газовой фазой адденгов, образующих с рудными элементами легко растворимые комплексные соединения. Но чем больше накапливается фактических и экспериментальных данных, тем проблематичнее и сомнительнее становится рудообразующий эффект этого явления. По современным представлениям наиболее часто определяющим фактором рудоотложения оказывается изменение кислотности — щелочности (рН) гидротермальных растворов, а в некоторых случаях их окислительно-восстановительного потенциала (Eh). Это связано с тем, что существует очень четкая и строгая зависимость устойчивости комплексных соединений рудных элементов даже от небольших сдвигов рН растворов. Эти сдвиги в свою очередь могут вызываться разными причинами: снижением температуры гидротермальных растворов, взаимодействием растворов с вмещающими породами, особенно при встрече на пути их движения контрастных по составу пород, смешением гидротермальных растворов разного происхождения или смешением отдельных порций одного и того же раствора, прошедших разные пути миграции и в разной степени прореагировавших с вмещающими породами. Но если мы все больше убеждаемся в решающей роли

при рудообразовании изменения рН и Eh гидротермальных растворов, то и новые геохимические методы поисков и оценки месторождений полезных ископаемых должны разрабатываться на основе выявления индикаторов, указывающих на интересующее нас изменение этих параметров.

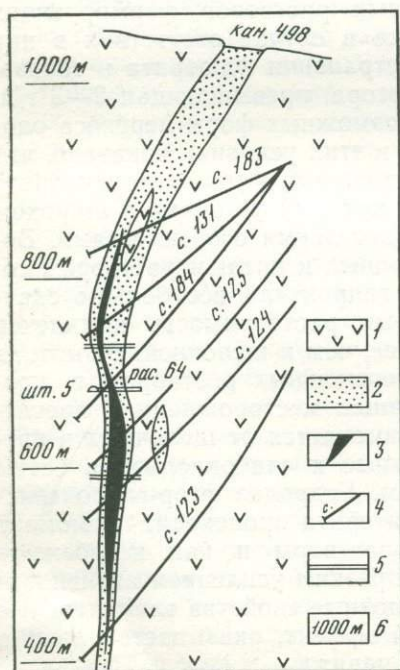
Изменение кислотности — щелочности рудообразующих растворов с неизбежностью должно приводить к изменению активности и, как следствие, распределению в околожильных породах прежде всего щелочных элементов, а также кислотных аддентов комплексных соединений, в форме которых мигрируют в растворах рудные элементы. Перспективность подобного подхода к разработке геохимических методов оценки на глубину минерализованных зон и поисков слепых рудных тел проиллюстрируем на примере некоторых оловянных и золотых месторождений. Изучение геохимии олова на сульфидно-касситеритовых и кварц-касситеритовых месторождениях и длительные экспериментальные исследования вооружили нас новыми, более определенными данными по физико-химической характеристике условий образования этих месторождений. Выяснено, что отложение основной массы касситерита на этих месторождениях происходит в интервале температур 320—380°С при давлении около 400—500 атм. Показано, что оловоносные гидротермальные растворы обладали невысокой минерализацией (до 10 вес. %) и по своему основному химическому составу отвечали хлоридно-бикарбонатным натриево-калиевым водам. Характерной особенностью гидротермальных растворов, формирующих оловорудные месторождения, даже в случае отсутствия в них или крайне ограниченного распространения флюорита и топаза, является высокая концентрация фтора, превышающая 2—3 г/л.

Экспериментальное изучение возможных форм переноса олова гидротермальными растворами в этих условиях показало, что олово мигрирует в них в виде прочного фтор-гидроксильного комплекса типа $[\text{Sn}(\text{OH})_x\text{F}_{(6-x)}]^{2-}$, который устойчив в широком диапазоне значений рН, но обладает двумя особенностями. Во-первых, по мере перехода от щелочных к кислым растворам соотношение в комплексе фтора и гидроксила все больше сдвигается в пользу фтора, и, во-вторых, растворимость комплекса в кислой области значительно выше, чем в щелочной. Эволюция щелочности — кислотности гидротермальных растворов в процессе рудообразования на оловянных месторождениях прослежена достаточно подробно. Она изменяется от щелочных в предыдущую стадию, через нейтральные к слабокислым, а затем вновь к слабощелочным растворам. Гидролиз фтор-гидроксильного комплекса и отложение касситерита происходит в момент перехода из кислых в щелочные растворы и как неизбежное следствие должно сопровождаться резким усилением активности щелочей (причем, чем сильнее щелочные свойства элемента, тем больше) и фтора. И тот и другой эффект, оказывается, можно использовать в интересующих нас целях.

Распределение щелочных элементов в околожильных породах было подробно изучено на одном из оловорудных тел Комсомольского района Хабаровского края, эталонный разведочный профиль которого показан на рис. 127. Околорудное пространство измененных пород опробовано сплошным керновым или бороздовым (в кан. № 498) опробованием до выхода в измененные вмещающие породы. Проверочное опробование керна скважин показало, что эндогенный ореол изучаемых элементов не выходит за пределы минералогически картируемого чехла измененных пород, и непосредственно примыкающие к опробованному интервалу породы характеризуются фоновым содержанием (т. е. зона минерализации опробована полностью). После анализа на содержание Li, Rb, Cs, Na и K были рассчитаны параметры (в работе приведены средние содержания и среднеквадратичные отклонения), характеризующие околорудные измененные породы на различных горизонтах минерализованных зон (мы называем

Рис. 127. Эталонный разведочный профиль (вкрест простирания рудной зоны)

1 — неизменные порфириты; 2 — измененные околорудные породы; 3 — рудное тело, турмалиновые метасоматиты с кварц-касситеритовой жилой; 4 — скважины; 5 — границы промышленного оруденения; 6 — абсолютные отметки



эти параметры погоризонтными). Статистический анализ полученных данных (табл. 28—30) показал, что эндогенный ореол щелочных элементов отличается следующими основными чертами:

1. Все элементы характеризуются аномальными содержаниями Li, Rb, Cs и K — положительными, Na — отрицательными.

2. Размах ореола каждого элемента увеличивается от подрудных частей зон минерализации к надрудным.

3. Изменения условий в течение процесса формирования зон минерализации находят свое отражение в существовании горизонтальной и вертикальной зональности ореола. Горизонтальная зональность выражается в преимущественном накоплении того или иного элемента в пределах определенной фации околорудных метасоматитов. Вертикальная зональность характеризуется увеличением средних содержаний K, Li, Rb и уменьшением — Na и Cs при движении вверх по разрезу.

4. Горизонтам рудных зон, несущим промышленное оруденение, соответствует наибольшая интенсивность околорудных изменений, с чем связано резкое увеличение значений среднеквадратичных отклонений содержаний элементов по сравнению с над- и подрудными интервалами зон минерализации. Продуктивность рудных тел сказывается на величинах средних содержаний, которые тем резче отличаются от фоновых, чем больше продуктивность оруденения.

Распределение отдельных элементов в зоне минерализации зависит от многих факторов, что, наряду с наличием общих закономерностей, неизбежно вызывает большое количество флуктуаций. Кроме того, неполное протекание околорудных замещений, наложение продуктов сменяющих друг друга во времени процессов, имеющих в ряде случаев противоположные тенденции, приводит к небольшим по величине вариациям средних содержаний элементов в вертикальном разрезе эндогенного ореола, что легко можно заметить из табл. 28. Это затрудняет практическое использование моноэлементных характеристик эндогенного ореола. Чтобы усилить сигнал и сделать его более устойчивым, предложен метод использования мультипликативных характеристик.

Отмеченные особенности вертикальной зональности распределения щелочей в околорудном пространстве позволили нам получить два показателя, закономерно изменяющих свои значения в вертикальном разрезе зон минерализации. Это показатель зональности $Li \cdot Rb \cdot K/Na \cdot Cs$ монотонно и последовательно возрастающий от подрудных частей зон минерализации к надрудным, и показатель мультипликативного ореола $Li \cdot Rb \cdot Cs \cdot Na \times \times K \cdot 10^{-9}$, значения которого монотонно возрастают в надрудных и подрудных частях зон соответственно к верхнерудной и нижнерудной границам. Максимальное значение показателя мультипликативного ореола отмечается на рудном интервале зон минерализации с промышленным содержанием олова, причем с увеличением оловянной продуктивности рудного тела увеличиваются значения показателя мультипликативного ореола (рис. 128).

Универсализация предлагаемых критериев включает в себе требование учета фоновых содержаний элементов в породах, вмещающих оруденение. Определение фоновых содержаний для различных типов пород (см. табл. 29) показало, что вопрос учета влияния фона достаточно сложен. Прямое нормирование по фону делением концентраций элементов на фоновые значения (так называемые приведенные к фону величины) не решает вопроса. Это объясняется тем, что интенсивность околорудного изменения зависит не только от условий, характеризующих воздействующий на породу раствор, но и от состава породы, точнее, от химической контрастности составов раствора и породы. Тем не менее сравнение с фоном необходимо. Как показывают первые данные, значения показателя зональности стремятся к фо-

Таблица 28. Значения погоризонтальных средневзвешенных содержаний щелочей, показателей мультипликативного ореола и зональности в пределах эталонного рудного объекта *

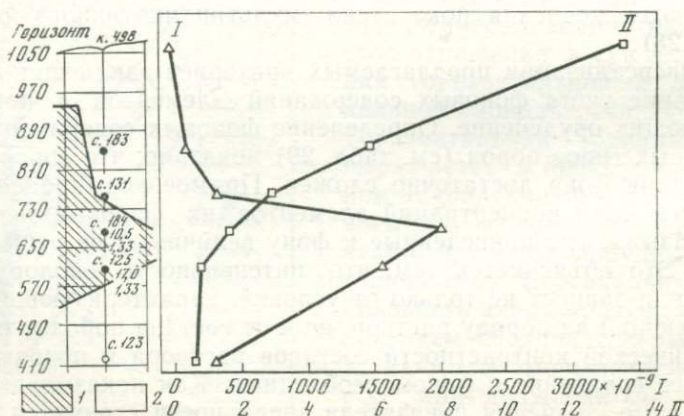
Элемент, показатель	Надрудная часть				Верхнерудная часть	
	скв. 498 n=27		скв. 183 n=39		скв. 131 n=37	
	\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²
Li	0,0127	0,0083	0,0137	0,0106	0,0200	0,0140
Rb	0,025	0,005	0,023	0,008	0,021	0,009
Cs	0,0012	0,0005	0,0016	0,0011	0,0012	0,0005
Na	0,05	0,02	0,08	0,08	0,28	0,43
K	2,56	0,50	2,42	0,95	2,37	1,21
Показатель мультипликативного ореола	48,77 (3,84)		97,61 (7,69)		334,45 (26,33)	
Показатель зональности	13,55 (677,5)		5,96 (298,0)		2,96 (148,0)	

* Здесь и в следующих таблицах в скобках даны значения приведенного к фоновому показателя.

новому показателю в подрудных частях зоны, значения показателя мультипликативного ореола близки к фоновому в надрудных и подрудных горизонтах, а отклонение этой величины на рудных интервалах от фоновых значений в общем тем больше, чем богаче оруденение, хотя о наличии корреляции говорить пока нельзя. Таким образом, получение универсальных, устойчивых критериев, позволяющих просто и надежно давать про-

Рис. 128. Характер изменения значений мультипликативного ореола (I) и показателя зональности (II) в вертикальном разрезе эталонного рудного объекта (проекция на вертикальную плоскость)

1 — контур рудного тела; 2 — вмещающие тела



Рудная часть				Подрудная часть	
скв. 184 n=43		скв. 125 n=52		скв. 123 n=12	
\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²	\bar{x}	S ²
0,0206	0,0187	0,0203	0,0258	0,0109	0,0086
0,030	0,012	0,024	0,015	0,020	0,010
0,0031	0,0031	0,0024	0,0022	0,0020	0,0017
0,35	0,42	0,60	0,55	0,35	0,44
2,99	1,47	2,26	1,07	2,06	0,96
2018,25 (158,92)		1572,35 (123,81)		309,64 (24,38)	
1,71 (85,2)		0,76 (38)		0,63 (31,5)	

гнозы, требует набора определенного количества материала с различных по продуктивности и условиям формирования зон. Тем не менее уже первые, чисто методические работы, позволили сделать ряд практических выводов, показавших практическую значимость полученного материала.

Рис. 129. Значения показателя мультипликативного ореола (I) и показателя зональности (II) в пределах прогнозного геологоразведочного профиля

1 — вмещающая толща кислых меловых эффузивов; 2 — юрская песчано-сланцевая толща; 3 — граница структурного несогласия; 4 — прогнозированное рудное тело

Рис. 130. Характер изменения значений показателя мультипликативного ореола (I) и показателя зональности (II) в вертикальном разрезе «безрудного» объекта (проекция на вертикальную плоскость)

1 — юрские песчаники кварц-полевошпатового состава; 2 — гранитоиды Силинского интрузивного комплекса

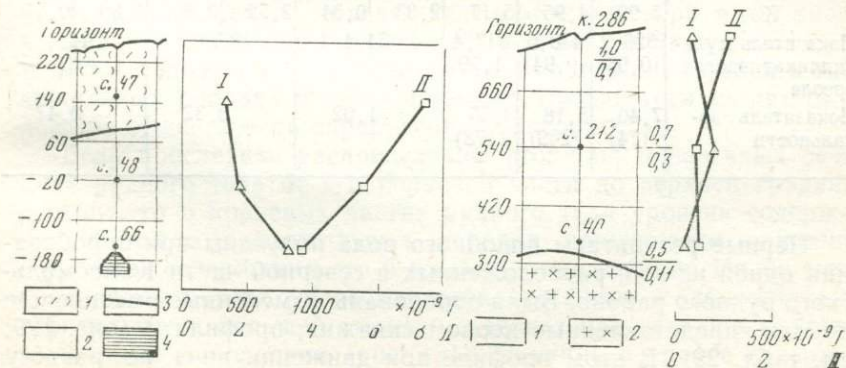


Таблица 29. Фоновые значения содержаний щелочных элементов, показателей мультипликативного ореола и зональности для различных пород, вмещающих околорудные зоны Комсомольского района

Элемент, показатель	Юрские песчаники кварц-полевошпатового состава		Меловые эффузивы среднего основного состава амутской свиты		Юрские песчано-сланцевые породы		Меловые эффузивы кислото-основного состава амутской свиты	
	\bar{x}	S^2	\bar{x}	S^2	\bar{x}	S^2	\bar{x}	S^2
Li	0,0021	0,0005	0,0018	0,0009	0,0029	0,0007	0,0035	0,0012
Rb	0,009	0,002	0,006	0,003	0,013	0,004	0,016	0,003
Cs	0,0006	0,0002	0,0006	0,0001	0,0021	0,0010	0,0009	0,0005
Na	2,78	0,35	1,46	0,24	2,23	0,43	2,08	0,27
K	2,41	0,39	1,32	0,65	2,58	0,44	3,17	0,49
Показатель мультипликативного ореола	75,98		12,70		455,50		332,32	
Показатель зональности	0,03		0,02		0,02		0,10	

Таблица 30. Значения горизонтальных средневзвешенных содержаний щелочных элементов, показателей мультипликативного ореола и зональности в пределах прогнозируемых объектов

Элемент, показатель	Зона А			Зона Б					
	Профиль 0			Профиль XII					
	скв. 47 n=17	скв. 48 n=10	скв. 66 n=6	кан. 286 n=11		скв. 212 n=15		скв. 40 n=12	
	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	S^2	\bar{x}	S^2	\bar{x}	S^2
Li	0,0082	0,0116	0,0122	0,0065	0,0057	0,0044	0,0046	0,0061	0,0045
Rb	0,032	0,026	0,027	0,017	0,004	0,022	0,008	0,013	0,006
Cs	0,0014	0,0016	0,0020	0,0007	0,0003	0,0010	0,0005	0,0009	0,0007
Na	0,15	0,18	0,24	0,36	0,45	0,77	0,70	0,34	0,18
K	5,92	4,95	5,17	2,33	0,54	2,52	0,69	1,83	0,65
Показатель мультипликативного ореола	326,2 (0,98)	430,0 (0,94)	817,4 (1,79)	64,4		187,8		44,4	
Показатель зональности	7,40 (74)	5,18 (259)	3,55 (178)	1,02		0,32		0,47	

Первые результаты подобного рода получены при опробовании одной из зон, расположенных в северной части Комсомольского рудного района. Были опробованы измененные вмещающие породы, представленные керном скважин, профиля 0 (рис. 129; см. табл. 29). В этом профиле при движении вниз по разрезу

наблюдается уменьшение показателя зональности до значений, близких к таковым для верхнерудных горизонтов эталонного профиля. Показатель мультипликативного ореола имеет низкие значения, несомненно увеличиваясь на горизонте скв. 66. Картина близко соответствует надрудной части зоны минерализации, причем можно предположить близость верхней границы оруденения к горизонту скв. 66. Иная картина наблюдается в профиле XII, взятом в зоне, залегающей среди юрских ороговикованных песчаников в южной части структуры Солнечного месторождения (табл. 30, рис. 130). Низкие значения показателя зональности в околорудных метасоматитах в кан. 286, а показателя мультипликативного ореола — в скв. 212 свидетельствуют о том, что горизонт пересечения скв. 212 приходится на центральную часть рудного интервала и, судя по сравнительно невысокому максимуму мультипликативного ореола, промышленного оруденения в этом профиле вряд ли приходится ожидать. Последующая разведка подтвердила сделанные прогнозы. Таким образом, использование закономерностей распределения в околожильных породах щелочных элементов позволяет на сульфидно-касситеритовых месторождениях достаточно надежно определять уровень эрозионного среза рудных тел и прогнозировать наличие оруденения на глубину с качественной оценкой последнего.

Еще более надежные данные полуколичественного характера получаются при поисках слепых рудных тел и оценке оруденения на глубину на оловорудных месторождениях, если использовать характерную черту рудоотложения — сопряженное возрастание при этом активности фтора. Как известно, формирование оловянных месторождений обычно сопровождается образованием околожильных пород кварц-мусковитового, кварц-серицитового, кварц-серицит-хлоритового типа. Уровень содержания фтора в околожильных породах, где он изоморфно замещает гидроксильную группу в новообразованных слоистых силикатах, пропорционален уровню содержания свободных ионов фтора в воздействующем на породу гидротермальном растворе. А последнее прямо связано с количеством гидролизовавшихся фтор-гидроксильных комплексов, находящихся в этом растворе, в том числе и олова по реакции: $[\text{Sn}(\text{OH}_2\text{F}_4)]^{2-} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{SnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{F}^-$. Следовательно, между уровнем содержания фтора в околожильных породах и количеством отложившегося касситерита должна существовать определенная зависимость.

Если проследить распределение фтора на поперечных сечениях рудного тела от его корневой части до верхней границы и выше, то в корневых частях рудного тела уровень содержания фтора в околожильных породах практически одинаков с уровнем содержания его в жильном выполнении. Но по мере продвижения вверх, уровень содержания фтора в околожильных породах все в большей степени начинает превосходить таковой в жильном выполнении (рис. 131). Разница в уровне содержа-

Рис. 131. Распределение фтора в поперечных сечениях рудных тел

а — выше рудного тела и в верхней его части; б — средняя часть рудного тела; в — нижняя (корневая) часть рудного тела; 1 — рудное тело; 2 — измененные вмещающие породы

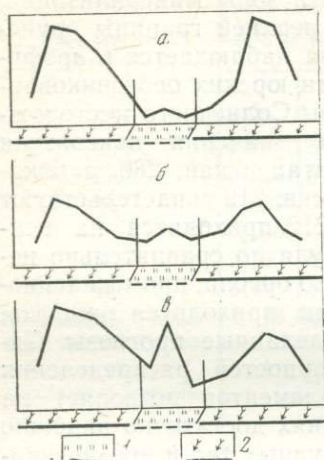
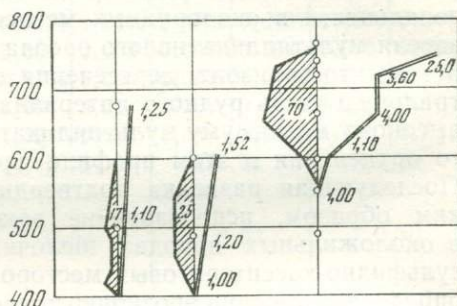


Рис. 132. Изменение отношения P_p/P_f в зависимости от скрытых линейных запасов олова (заштрихованный контур в масштабе отражает скрытые линейные запасы)



ния фтора в околожильных породах и жильном выполнении оказывается тем большей, чем больше лежащие ниже линейные запасы олова¹, причем величина этой разницы в уровнях содержания фтора, зафиксированная на верхней границе рудного тела, примерно сохраняется и выше его на протяжении до 200 м в зависимости от мощности зоны минерализации (рис. 132).

Распределение изоморфной примеси между водным раствором и находящейся в равновесии с ней кристаллической фазой при отсутствии каких-либо реакций с участием этого компонента описывается законом Берто-Юнгфлейша-Нернста. Переход к условиям становления зон минерализации можно осуществить, сделав ряд допущений и используя уравнение коэффициента распределения микропримеси, выведенное И. Д. Рябчиковым. В преобразованном виде это уравнение имеет вид:

$$K = A \cdot F_{op} / F_p + B \cdot m_p / m_{op},$$

где K — коэффициент распределения фтора между эндогенным ореолом рудного тела и жильным выполнением, F_{op} — средневзвешенное содержание фтора в ореоле, F_p — средневзвешенное содержание в жиле, m_{op} — мощность ореола, m_p — мощность жильного тела, A и B — коэффициенты.

¹ Линейные запасы — запасы олова в вертикальном разведочном профиле ниже анализируемого разреза на всю вертикальную протяженность рудного тела, горизонтальную мощность и 1 м простирания.

Слагаемые полученного уравнения неравнозначны. Колебания отношения m_p/m_{op} главным образом связаны с величиной m_p , которая обычно мало меняется, а местные раздувы и пережимы могут вносить случайные ошибки. Между величинами F_{op}/F_p и $Q_{лин}$ (линейными запасами олова) установлена корреляционная связь. Зависимость этих двух величин выражается кривой, близкой гиперболы. Для практического применения оказалось удобнее использовать обратную величину отношения $F_p/F_{op} = K_p$. При таком приближенном подходе к определению коэффициента распределения для отдельных рудных районов приходится определять свое уравнение зависимости F_p/F_{op} от $Q_{лин}$. В результате оказалось возможным, проводя предварительное эталонирование на разведанных профилях, по рассчитанному уравнению, определять линейные запасы олова, скрытые ниже опробованного уровня. Рудные зоны Комсомольского района характеризуются общей линейной зависимостью, выраженной уравнением

$$Q_{лин} = 68,5 - 59,3K'_p \quad (1)$$

Линейные запасы в жильных телах Кавалеровского района Приморья определяются формулой

$$Q_{лин} = 5,1 - 3,8K'_p.$$

Проверка применимости метода на месторождениях Омсукчанского рудного узла показала, что на наиболее мощных зонах можно пользоваться формулой (1), на зонах же мощностью менее 1 м было выявлено уравнение, характеризующее Омсукчанский район.

Зоны минерализации Комсомольского района отмечаются значительной мощностью рудных тел. На рудных телах, сравнительно маломощных, формула (1) приводит к завышению прогнозных запасов по сравнению с фактическими за счет пренебрежения вторым членом уравнения (1). Как показал опыт, мощность ореола меняется мало по сравнению с мощностью рудного тела. Это позволило внести поправку в уравнение (1) на мощность рудного тела, пренебрегая изменением величины m_{op} . Таким образом, окончательная прогнозируемая величина на рудных телах, характеризующихся значениями $m_p < 4$ м, равна $Q_{пр} = Q_{лин}R$, где $R = 0,09 + 0,24 m_p$. Прогнозной оценке могут подвергаться любые линейно вытянутые зоны минерализации, будь то собственно жильные тела или минерализованные зоны дробления, или прожилковые зоны, которые отвечают двум условиям:

- а) отсутствием или весьма ограниченным распространением в них собственных минералов фтора (топаз, флюорит и др.),
- б) возможностью четкого разграничения жильного выполнения (кварцевые, кварц-турмалиновые, кварц-хлоритовые и другие

породы) от околожильных вмещающих пород, причем мощность жильного выполнения должна быть не меньше 0,2 м.

Определение прогнозных линейных запасов олова проводится по намечаемым разведочным профилям. Для предварительной оценки зоны достаточно определение прогнозных линейных запасов олова через профиль, т. е. через 160 м по простиранию минерализованной зоны. Если прогнозная оценка ведется по поверхностным выработкам, то опробуется канава, находящаяся в интересующем нас профиле, и две соседние. Прогноз по этому профилю дается как среднее, вычисленное по трем поперечным сечениям зоны. В зависимости от потребности опробованию с целью прогнозирования на глубину могут подвергаться не только поверхностные выработки, но и подземные, а также керн скважин при условии его хорошего выхода. Горные выработки, предназначенные для прогнозного опробования (канавы, расщепки) необходимо добывать до появления на флангах неизменных вмещающих пород для того, чтобы можно было опробовать полное пересечение от неизменных пород на одном фланге, через измененные околожильные породы, рудную зону, околожильные породы на другом фланге и вновь до неизменных вмещающих пород. По выбранным горным выработкам проводится сплошное опробование бороздой малого сечения (3×5 см) с длиной проб — 0,5 м. Следует подчеркнуть необходимость сплошного опробования ввиду резко неравномерного распределения фтора в ореоле.

В пределах жильного выполнения длина проб может быть меньшей, но важно, чтобы пробы жильного выполнения строго разграничивались от проб околожильных вмещающих пород. Если такого разграничения не будет и в пограничную пробу будет включено и жильное выполнение, и околожильные породы, прогноз будет неверен. Обработка бороздовых проб производится обычным способом по общепринятым схемам. Растертые пробы поступают в лабораторию, где в них определяется содержание фтора. По полученным результатам строится график распределения фтора и олова в каждом поперечном сечении минерализованной зоны. На графике по данным опробования и геологической документации выделяются интервалы, отвечающие жильному выполнению и прилегающим к нему в околожильных породах ореола фтора, как это, например, показано на рисунке. На месторождениях кварц-турмалинового типа в интервал рудной зоны включаются турмалиниты, обычно связанные с продуктивной стадией непрерывным переходом и характеризующиеся повышенным содержанием олова. Наибольшая трудность на этом этапе — определение внешних границ ореола фтора. Обычно к жильному выполнению с обеих сторон прилегают максимумы фтора. За внешнюю же границу ореола принимается ближайший следующий за максимумом минимум содержания фтора, причем проба, соответствующая этому минимуму, уже не включается в подсчет. На выделенных интер-

валах определяется средний уровень содержаний фтора в ореоле (ор) и в рудном теле (р) по формулам

$$F_{\text{ор}} = \frac{\sum_i^n C_i l_i}{l_i} - C_{\text{ф}} \quad \text{и} \quad F_{\text{р}} = \frac{\sum_i^k C_i l_i}{\sum_i^k l_i},$$

где C_i — содержание фтора, l_i — длина бороздовой пробы, $C_{\text{ф}}$ — фоновые содержания фтора (в вес. %) во вмещающих рудное тело породах, не затронутых околожильными изменениями (хотя они и могут быть изменены предшествующим рудообразованием региональным метаморфизмом). Уровень содержания фтора в околожильных породах подсчитывается в обоих зальбандах и затем берется среднее между ними. В ряде случаев по тем или иным причинам содержания F в различных зальбандах заметно различаются. Опыт показывает, что при различии средних концентраций в 2 и более раз, следует учитывать лишь значение $C_{\text{ф}}$ на фланге, имеющем большее содержание фтора. Полученные величины исходные для всех последующих расчетов. Необходимо рекомендовать при использовании метода в новых районах проведение предварительного эталонирования на разведанных объектах, если такие объекты имеются. Полученные для каждого профиля значения по трем параллельным сечениям (отстоящим друг от друга на 20 м) усредняются и наносятся на продольную вертикальную проекцию, как это показано для примера на рисунке 133.

Полученные данные позволяют провести оценку зоны с точностью, как показал опыт, до 30% и определить наиболее рациональную схему ее разведки. Конечно, для ускорения прогнозной оценки зон можно в каждом изучаемом профиле анализировать распределение фтора только по одной поперечной выработке, а не по трем, как это предлагается, но в этом случае возможность ошибки заметно возрастает. Используя постоянство значения K'_p , у нижней границы рудного тела всегда равное 1,0, была также предпринята попытка, исходя из величины K'_p для данного поперечного сечения рудного тела, определить вертикальную протяженность оруденения. Как показывает опыт работы в Комсомольском оловорудном районе (Хабаровский край), при значениях $K'_p < 0,80$ вертикальная протяженность оруденения (H_p) практически всегда определяется в 200—250 м. В интервале же значений K'_p от 0,80 до 1,0 ее можно оценить по формуле $H_p = 991 - 936 \cdot K'_p$. Конечно, это весьма грубая ориентировочная оценка вертикальной протяженности оруденения, но в ряде случаев она может оказаться полезной.

В качестве примеров использования предложенного метода оценки оруденения на глубину рассмотрим результаты промышленной проверки прогнозов по ряду рудных зон. На рис. 133

изображен вертикальный разрез одной из рудных зон, на котором приведены прогнозные линейные запасы по четырем разведочным профилям по поверхностным выработкам (канавы 955, 899 и 988) и фактически определенные линейные запасы олова после разведки. Там же показана прогнозная и реально установленная нижняя граница рудного тела.

На рис. 134 показан еще один интересный пример прогнозной оценки масштаба оруденения на глубину на другой рудной зоне. Распределение продуктивности (в метро-процентах) на поверхности по простираанию рудного тела как будто бы свидетельствует о том, что кан. 177 находится в центре рудного тела,

Рис. 133. Прогнозная оценка одной из рудных зон и результаты ее последующей разведки

Профиль —III — <5/<5; профиль —I — 11/10; профиль I — 5/4; профиль III 9/9 (в числителе приведены прогнозные запасы, в знаменателе — разведанные запасы, в тоннах)

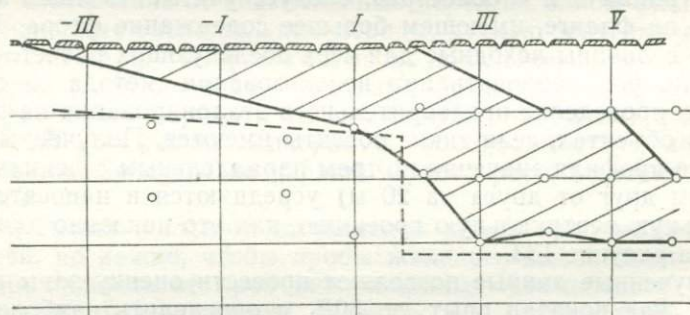
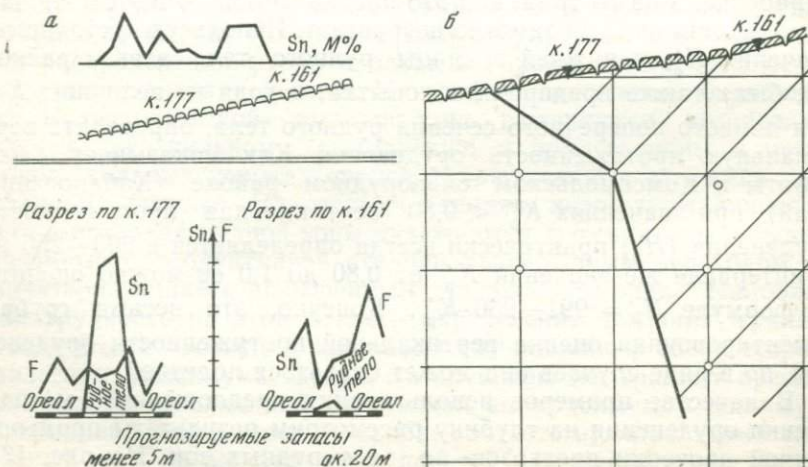


Рис. 134. Прогнозная оценка скрытых запасов олова по разведанной на поверхности зоны (а) и результаты последующей разведки



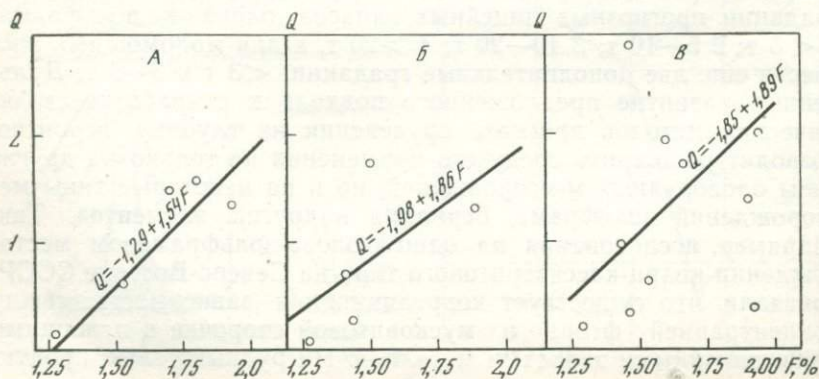
а кан. 161 — на фланге за пределами рудного тела. Там же показано распределение фтора и олова в поперечных сечениях зоны минерализации по обеим канавам. Проведенный по этим данным расчет прогнозных линейных запасов олова на глубину показал совсем иную картину. В профиле кан. 177 прогнозные запасы определены < 5 т, а в профиле кан. 161 — около 20 т, что указывает на бесперспективность глубинной разведки в первом случае и наличии на глубине промышленных руд во втором. Последующая глубинная разведка и здесь подтвердила правильность сделанного прогноза.

В целом, как в процессе промышленной проверки предложенного метода, так и его практического использования к настоящему времени уже проверено более 50 прогнозов по разведочным профилям различных рудных зон, что уже позволяет ориентировочно оценить достоверность прогнозной оценки этим методом оруденения на глубину. По предварительным данным из 40 выданных независимо от наличия оруденения на поверхности отрицательных прогнозов на глубину подтверждено практически 100%, а из 18 положительных прогнозов последующей разведкой подтверждено 11, т. е. $\sim 60\%$. Таким образом, проведенная проверка показала высокую эффективность предложенного геохимического метода предварительной отбраковки и прогнозной оценки на глубину оловорудных зон по характеру первичных ореолов фтора, что имеет первостепенное значение для выбора наиболее благоприятных участков их глубинной разведки. Вместе с тем нельзя не отметить, что получаемая по предложенным формулам точная количественная оценка прогнозных линейных запасов олова по разведочным профилям часто приводит к неправильному пониманию существа прогнозирования и излишней абсолютизации получаемых цифр. Представляется более рациональным и объективным давать оценку линейных запасов олова по разведочным профилям не в виде конкретных полученных цифр, а по определенным интервалам запасов, т. е. перейти на полуколичественную интерпретацию результатов, что не уменьшит, а даже увеличит прогностическую ценность предложенного метода. Видимо, целесообразно принять следующие градации прогнозных линейных запасов олова и вольфрама: 1 < 5 т; 2 5—10 т; 3 10—20 т; 4 > 20 т, а для маломощных жил ввести еще две дополнительные градации: < 3 т и 3—5 т. Дальнейшее развитие предложенного подхода к разработке геохимических методов прогноза оруденения на глубину, вероятно, позволит расширить среду его применения не только на другие типы оловорудных месторождений, но и на некоторые типы месторождений вольфрама, бериллия и других элементов. Так, например, исследования на одном олово-вольфрамовом месторождении кварц-касситеритового типа на Северо-Востоке СССР, показали, что существует корреляционная зависимость между концентрацией фтора в мусковитовой оторочке и лежащими ниже линейными запасами металлов. На рудных телах, продук-

тивных на Sn, но с убогим вольфрамовым оруденением, наблюдается корреляция между содержаниями фтора и нижележащими запасами олова. В жилах, несущих вольфрамовое оруденение при отсутствии промышленных запасов олова, обнаруживается корреляция с запасами вольфрама. Рудные тела, характеризующиеся комплексным оруденением, показывают наличие корреляции F в оторочке с суммарными запасами металла (Sn + W). Угол наклона прямых, отражающих описанные зависимости (рис. 135), приблизительно постоянен. Отсюда следует, что при оценке скрытых на глубине запасов олова и вольфрама на месторождениях кварц-касситеритового типа по содержанию фтора в мусковитовой оторочке, следует относить этот показатель к суммарной продуктивности рудных тел (Sn + W).

До сих пор речь шла об использовании в прогнозных целях геохимических индикаторов изменения щелочности — кислотности гидротермальных рудообразующих растворов. Как можно было убедиться, такие индикаторы существуют, и применение на практике на этой основе геохимических методов прогноза и оценки оруденения на глубину оказывается не только высокоэффективным, но практически впервые переведет геохимические методы из разряда качественных методов в разряд количественных. По всей видимости, можно найти критерии и признаки, указывающие также на действие и второго по значению фактора рудообразования: изменение окислительно-восстановительной обстановки. Но работы в этом направлении только начинаются, и достоверных геохимических индикаторов, имеющих практическое значение еще не выявлено. Есть надежды использовать в этих целях изменение соотношения различных валентных форм элементов в минералах и соотношения в газовой-жидких включениях летучих компонентов, характеризующих окислительно-вос-

Рис. 135. Соотношение изотопного состава углерода карбонатов от содержания золота в пробе



становительную обстановку (CO/CO_2 ; CO_2/CH_4 и т. д.). Существенное значение может приобрести и определение изотопного состава ряда элементов и прежде всего изотопного состава углерода.

Дело здесь в том, что уголекислота, образующаяся при окислении органического вещества, имеет изотопный состав углерода, отличающийся от изотопного состава уголекислоты любого другого происхождения. Даже относительно небольшая добавка такой уголекислоты должна сдвигать изотопные отношения углерода в уголекислоте гидротермальной системы в сторону более низких значений $\delta^{13}\text{C}$. Поэтому аналогичный сдвиг изотопного состава углерода в отлагающихся из гидротермальных растворов карбонатов может однозначно указывать на наличие в процессе рудообразования окислительно-восстановительных реакций с участием органического вещества. С этих позиций и было проведено предварительное изучение изотопного состава углерода гидротермальных карбонатов на двух золоторудных месторождениях. Оказалось, что карбонаты рудной стадии (а следовательно, и уголекислота, участвующая в процессе их формирования) действительно заметно обогащены легким изотопом углерода относительно до- и послепродуктивных стадий. Так, на одном из золото-сульфидных месторождений Армении $\delta^{13}\text{C}$ карбонатов допродуктивной и послепродуктивной стадии колеблется от $+0,6$ до $+4,5\%$, тогда как $\delta^{13}\text{C}$ карбонатов продуктивной стадии изменяется от $-0,6$ до $-4,8\%$. Наряду с этим, анализ газовой-жидких включений в минералах показывает, что содержание уголекислоты в гидротермальной системе в рудную стадию возрастает. Внутри самой продуктивной стадии обогащение карбонатов легким изотопом углерода неравномерно. Причем пробы с наиболее высокими содержаниями золота отличаются и наиболее низкими значениями $\delta^{13}\text{C}$ карбонатного материала. Еще более отчетливо видна связь между степенью обогащения изотопного состава углерода карбонатов и содержанием золота в минеральной ассоциации на одном из золото-серебряных месторождений Северо-Востока СССР. Здесь изотопный состав углерода карбонатов продуктивной стадии характеризуется еще более низкими значениями $\delta^{13}\text{C}$ от $-9,8$ до $-14,7\%$ (см. рис. 135).

Более четко проявляется корреляция между величинами $\delta^{13}\text{C}$ карбонатов продуктивной стадии и содержанием золота в пробе. На верхнем из опробованных горизонтов месторождения при уровне доверительной вероятности 95% коэффициент корреляции между этими величинами составляет $+0,87$, а на нижнем $+0,58$. Таким образом, обогащение карбонатов продуктивной стадии минералообразования, вероятно, однозначно указывает на протекание в гидротермальной системе окислительно-восстановительных реакций с участием органического вещества в момент рудоотложения, приводящих к осаждению из раствора золота и серебра. Причем, чем выше была интенсивность этого

процесса, отражающаяся в степени обогащения системы изотопно-легкой углекислотой, тем более интенсивно и проходило накопление в рудах золота и серебра. Во всяком случае, нет сомнения в том, что именно здесь, в поиске, выявлении и использовании действия индикаторов, определяющих факторов рудоотложения, действие своего рода геохимических барьеров лежит столбовая дорога дальнейшего развития геохимических методов поисков и оценки месторождений полезных ископаемых, роль которых в практике геологоразведочных работ трудно переоценить.

Заканчивая рассмотрение проблем оценки масштаба оруденения по геохимическим данным, отметим, что исследования в этом направлении только начаты. Важнейшим методологическим подходом в этой области представляется дальнейшее углубленное изучение (с привлечением математических методов и ЭВМ) выдержанных связей между параметрами месторождений и окаймляющих их первичных геохимических ореолов. Оценка же масштаба оруденения по параметрам гипергенных ореолов рассеяния элементов-индикаторов, естественно, будет надежной только при условии тесного соответствия первичных и адекватных вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов.

УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ
ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ПРИ ПОИСКОВЫХ РАБОТАХ

Поисковые работы, как известно, обычно проводятся в пределах перспективных площадей, выделенных по результатам предшествующей поисковым работам геологической съемки. Относительно высокая степень геологической изученности территории страны обуславливает актуальность разработки эффективных методов крупномасштабных поисков, в том числе и геохимических. Из геохимических методов на этапе крупномасштабных поисков наиболее эффективно применение литохимического опробования в масштабе 1 : 25 000 и 1 : 10 000 в зависимости от типов развитых в исследуемых районах месторождений. В ряде случаев, когда поиски ведутся на месторождениях с ограниченными размерами рудных тел и их первичных геохимических ореолов (ртутные, золоторудные и др.), сеть опробования может быть сгущена до масштаба 1 : 5000.

Бурное развитие исследований по разработке и внедрению в практику геологоразведочных работ различных геохимических методов приводит как к созданию новых методов, так и к коренному совершенствованию существующих. Поэтому, как это ни парадоксально, в настоящее время вызывает озабоченность не столько отсутствие где-либо на вооружении геохимических методов поисков, сколько изобилие их различных модификаций. В связи с этим в первую очередь, мы хотели бы указать на необходимость перманентной переоценки возможностей каждого из методов и способов и оперативной корректировки на этой основе принципов рационального комплексирования различных геохимических методов в зависимости от конкретных геологических и географических условий и решаемых задач. Анализ состояния применения геохимических методов на практике (как, впрочем, и других методов) показывает, что часто под рациональным комплексированием подразумевается включение в комплекс работ минимально возможного числа различных методов без оценки информативности каждого из них и исключения на этой основе малоинформативных, что, естественно, приводит к неоправданным денежным затратам и снижению экономической эффективности геологоразведочных работ. Главная причина возникновения подобных ошибок в комплексировании геохимических методов в том, что разработка одних методов производится изолированно от других конкурирующих и постоянно не проводится сопоставления возможностей различных методов

с целью оценки на этой основе информативности данного рекомендуемого метода. Таким образом, в настоящее время, когда мы располагаем многими детально разработанными методами, важнейшей задачей представляется не столько собственно внедрение каждого из них, а именно оценка сравнительной эффективности различных методов с целью научно обоснованного выбора наиболее информативного для данных конкретных условий метода или комплекса методов.

Геохимические методы нашли наиболее широкое применение при поисках эндогенных рудных месторождений, поэтому вопросы их приложения рассматриваются в основном на примере месторождений этой группы. Рациональная методика геохимических поисков рудных месторождений определяется как ландшафтно-геохимическими условиями конкретных территорий, так и пространственным положением месторождений относительно эрозионной поверхности, современной и древней. По последнему признаку для целей геохимических поисков целесообразно выделить следующие две основные группы месторождений: открытые и скрытые.

К открытым относятся месторождения, имеющие выход на современную эрозионную поверхность. Эти месторождения в литературе известны также под названием «легкооткрываемых», так как сравнительно легко могут быть обнаружены визуальными методами поисков. К группе открытых мы относим как месторождения, вскрытые эрозией в районах с хорошей обнаженностью рудовмещающих пород (коренные породы и оруденение непосредственно выходят на дневную поверхность), так и месторождения, вскрытые эрозией и перекрытые элювио-делювиальными отложениями ограниченной мощности (несколько метров). В этих образованиях в результате гипергенного разрушения рудных тел и их первичных ореолов формируются вторичные остаточные литохимические ореолы рассеяния элементов-индикаторов, служащие надежными признаками подобных месторождений.

Группа скрытых месторождений более разнообразна, среди них выделяются следующие:

1. Слепые, не имеющие выхода рудных тел на дневную поверхность. К этой группе отнесены месторождения в открытых районах, где рудовмещающие породы обнажены на поверхности (рис. 136) или же перекрыты элювио-делювиальными отложениями ограниченной мощности (несколько метров). В этих отложениях в результате разрушения вскрытых эрозией первичных ореолов также образуются вторичные открытые литохимические ореолы рассеяния типоморфных для данного типа оруденения элементов-индикаторов. Слепые месторождения, как уже отмечалось неоднократно, сопровождаются значительными по размерам первичными ореолами, обычно выходящими на поверхность и служащими хорошими признаками месторождений этого типа.

2. Погребенные месторождения, когда вскрытые древней эрозионной поверхностью месторождения перекрыты аллохтонными отложениями (см. рис. 136).

3. Слепо-погребенные месторождения, когда породы, вмещающие слепые месторождения (не вскрытые древней эрозионной поверхностью), перекрыты аллохтонными отложениями (см. рис. 136).

Своеобразие каждого из этих положений месторождений относительно эрозионной поверхности в значительной степени и определяет подбор и применение рационального комплекса поисковых методов, в том числе и геохимических. При поисках открытых (легкооткрываемых) месторождений геохимические методы наиболее эффективно используются обычно в новых, геологически относительно слабоизученных районах, где фонд открытых месторождений еще не исчерпан. В отличие от этого, в районах с высокой степенью геологической изученности в связи с истощением фонда легкооткрываемых месторождений, методика поисков, в том числе и геохимических, должна быть адекватна проблеме обнаружения скрытых месторождений. При поисках открытых месторождений наиболее широко и эффективно используется метод поисков по остаточным вторичным литохимическим ореолам рассеяния элементов-индикаторов. Выполненными в последние годы исследованиями по изучению степени адекватности параметров геохимических аномалий в коренных породах и перекрывающих их рыхлых отложениях доказана возможность и высокая эффективность использования особенностей

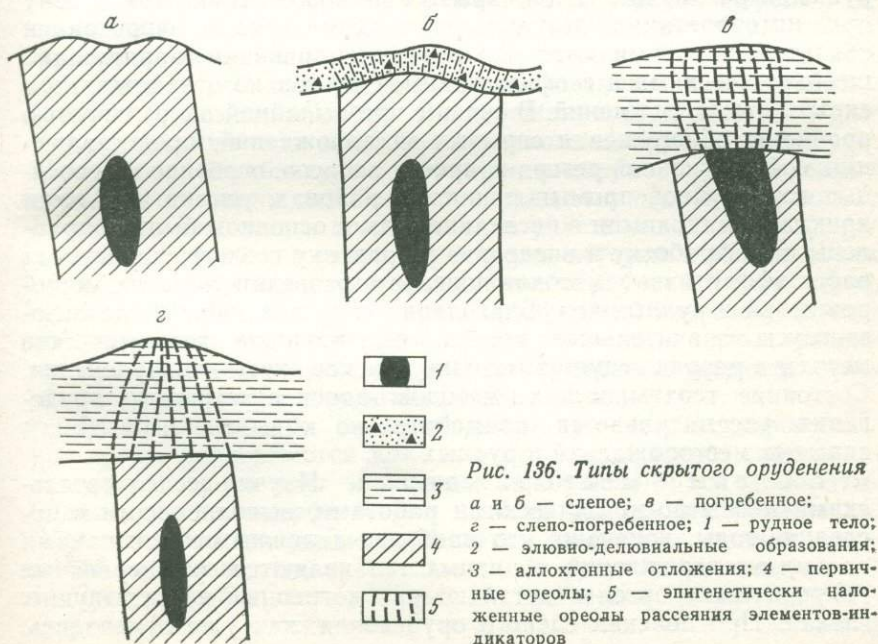


Рис. 136. Типы скрытого оруденения

а и б — слепое; в — погребенное;
 z — слепо-погребенное; 1 — рудное тело;
 2 — элювио-делювиальные образования;
 3 — аллохтонные отложения; 4 — первичные ореолы; 5 — эпигенетически наложенные ореолы рассеяния элементов-индикаторов

состава и строения первичных ореолов для оценки уровня эрозийного среза оруденения по параметрам вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов. Этот вопрос детально был рассмотрен выше.

Во многих случаях по причине существенного перераспределения элементов-индикаторов в гипергенных условиях критерии первичных ореолов не могут быть надежно использованы при оценке вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов. Это характерно для остаточных ореолов, развитых в глинистых отложениях, особенно в древних корах выветривания. В этих условиях, как было установлено А. И. Перельманом [64] необходим обязательный учет влияния эпигенетических процессов на закономерности миграции химических элементов и, в особенности, на образование геохимических барьеров. Важные в теоретическом и практическом отношении случаи формирования сложных по строению вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов для различных ландшафтно-геохимических условий обширных территорий Сибири описаны В. В. Поликарпочкиным [65]. Эти исследования вскрывают сложные взаимоотношения первичных и вторичных ореолов, весьма затрудняющие интерпретацию результатов литохимического опробования.

Следует отметить, что раздельное рассмотрение вопросов поисков открытых и скрытых месторождений продиктовано лишь удобством изложения материала и вовсе не означает изолированное ведение поисковых работ, ибо при поисках открытых месторождений всегда следует иметь в виду возможность обнаружения различных типов скрытых месторождений. Вот почему при интерпретации результатов геохимического опробования обязательно учитываются геохимические признаки (наряду с общегеологическими и геофизическими) не только открытых, но и скрытых месторождений. В связи с чрезвычайной актуальностью проблемы обнаружения скрытых месторождений, представляющих собой основной резерв прироста запасов, особенно в освоенных горнорудной промышленностью районах, усилия в области прикладной геохимии в последние годы в основном были направлены на разработку и внедрение в практику геологоразведочных работ эффективных методов поисков и разведки скрытых месторождений и рудных тел. Благодаря этому в данной области достигнуты значительные успехи, выдвинувшие геохимические методы в разряд ведущих методов поисков скрытого оруденения. Состояние геохимических методов поисков скрытого оруденения рассматривается применительно к выделенным типам скрытых месторождений и рудных тел.

1. Слепые месторождения. Научно-исследовательскими и опытно-методическими работами, выполненными в последние годы, доказано, что наиболее надежными признаками слепых месторождений и рудных тел являются их первичные геохимические ореолы, детально рассмотренные в предыдущих главах. При поисках слепого оруденения, как уже отмечалось,

широко используются первичные ореолы или же сопряженные с ними в пространстве вторичные литохимические ореолы рассеяния элементов-индикаторов. Методика геохимических работ при поисках слепого оруденения рассматривается для условий хорошей обнаженности рудовмещающих коренных пород.

Опробование. На этапе поисковых работ в пределах перспективных участков проводится площадное геохимическое опробование коренных пород по профилям, ориентированным вкрест простирания известных или предполагаемых структур. Сеть опробования 250×25 м (масштаб 1 : 25 000), 100×10 м (масштаб 1 : 10 000), в отдельных случаях 50×5 (масштаб 1 : 5000). Отбор проб из коренных пород производится методом пунктирной борозды, который заключается в отборе из каждого интервала опробования 5—6 сколков пород (через равные расстояния), которые объединяются в одну пробу весом 150—200 г. Встреченные по профилю жилы, а также зоны разломов опробовываются отдельно. При смене пород опробование производится с таким расчетом, чтобы каждая отдельно взятая проба включала сколки только одной разности пород, что обычно достигается путем соответствующего изменения интервала опробования.

Обработка проб. После дробления (до крупности 1 мм) материал пробы квартуется: одна половина хранится в качестве дубликата, а вторая после истирания передается на анализ. Отметим, что сравнительно низкие (субкларковые) содержания элементов-индикаторов в первичных ореолах требуют особой тщательной обработки геохимических проб, исключающей заражение их посторонними материалами и в первую очередь рудными пробами, характеризующимися весьма высокими содержаниями элементов-индикаторов. Недопустима обработка геохимических проб на агрегатах, использованных для обработки рудных (бороздовых) проб. Во избежание возможного загрязнения геохимических проб можно рекомендовать их дифференцированную обработку: по результатам документации коренных пород по профилям опробования выделяются пробы, отобранные из рудных тел, жил и прожилков, из участков видимой минерализации, из участков измененных пород, которые в обязательном порядке обрабатываются только после обработки бедных проб, а перед обработкой новой партии дробильный агрегат тщательно очищается. Хороший эффект очищения дает использование пустых (фоновых) проб, которые пропускаются через дробильные агрегаты после обработки богатых проб.

Анализ проб. Все отобранные при геохимических поисках пробы подвергаются прежде всего экспрессному спектральному анализу на круг элементов, включающий все элементы-индикаторы типоморфных для данного района месторождений. Элементы-индикаторы месторождений различных рудных формаций, как известно, определяются по результатам опытно-методических работ, выполненных на известных (эталонных) месторождениях. Однако, как отмечалось выше, многие элементы

являются сквозными индикаторами различных по составу и условиям локализации месторождений, поэтому при выборе перечня анализируемых элементов можно использовать данные об элементном составе ореолов месторождений различных рудных формаций, приведенных в табл. 31. По данным этой таблицы, полученным в результате изучения многочисленных эндогенных рудных месторождений, типоморфный для эндогенных месторождений перечень элементов, определяемых экспрессным спектральным анализом с удовлетворительной чувствительностью, включает барий, свинец, цинк, медь, молибден, кобальт, никель, олово, бериллий, ванадий. Удовлетворительной мы считаем чувствительность, когда величины порога чувствительности анализа

Таблица 31. Элементный состав первичных ореолов различных месторождений

Тип месторождений	Элементный состав
Редкометалльные пегматиты	Li, Rb, Cs, Nb, Sn, Ta, W, Be, As
Медно-никелевые	Cu, Ni, Co, Ba, Pb, Zn, Ag, Bi, Sn, Be, W, Zr
Медно-колчеданные	Ba, Ag, Pb, Cd, Zn, Bi, Cu, Co, Mo
Вольфрам-молибденовые в скарнах	Ba, Ag, Pb, Zn, Sn, Cu, W, Mo, Co, Ni, Be, V
Висмутовые в скарнах	As, Pb, Ag, Zn, Co, Cu, Bi, Ni
Оловорудные	Sn, Pb, As, Cu, Bi, Zn, Ag, Mo, Co, Ni, W
Полиметаллические в скарнах	Sb, Cd, Ag, Pb, Zn, Cu, Bi, Ni, Co, Mo, Sn, W, Be
Золоторудные	Au, Sb, As, Ag, Pb, Zn, Mo, Cu, Bi, Co, Ni, W, Be
Медно-порфиновые	Ba, As, Sb, Ag, Pb, Zn, Au, Bi, Cu, Mo, Sn, Co, W, Be
Медные	Ba, As, Pb, Zn, (Ag, Sn)Cu, Bi, Co, Ni, Mo
Медно-молибденовые	Cu, Mo, As, Ag, Pb, Zn, Bi, Co, Ni, Be, W
Полиметаллические	Ba, Sb, As, Ag, Pb, Zn, Cu, Bi, Mo, Co, Sn, W
Урановые	U, Ag, Pb, Zn, Cu, Mo, Co, Ni, V
Стратиформные свинцово-цинковые	Ba, As, Cu, Ag, Pb, Zn, Co, Ni, Be, V
Сурьмяно-ртутные	Sb, Hg, As, Cu, Ag, Pb, Zn, Be, Co, Ni, W, Sn
Ртутные	Hg, Ba, Ag, Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Sn, Mo, W
Общий перечень элементов-индикаторов	Li*, Rb, Cs, Hg, Au, U, Ta, Sn, W, Be, Ba, Cd, Ag, Pb, Zn, Cu, Mo, Co, Ni, As, Sb, Zr, Nb, V

* Полу жирным шрифтом набраны элементы, требующие специальных методов анализа, так как приближенно-количественный спектральный метод, применяемый для остальных элементов, не дает удовлетворительных результатов.

и среднефоновых содержаний элементов укладываются в один порядок. Приведенный выше перечень элементов должен быть расширен за счет серебра, кадмия, мышьяка, сурьмы и вольфрама, ореолы которых весьма характерны для эндогенных месторождений (особенно содержащих сульфиды) и в большинстве случаев фиксируются по результатам спектрального анализа, хотя чувствительность последнего на эти элементы и не является удовлетворительной. Приведенный в табл. 31 обязательный для спектрального анализа перечень элементов-индикаторов, естественно, может быть расширен за счет дополнительных, выявленных в результате изучения конкретных месторождений. К числу таких индикаторов, в частности, может быть отнесен иттрий, образующий отчетливые ореолы на ряде урановых и молибденовых месторождений (например, на месторождении Тырнауз), и другие элементы.

Из-за недостаточной чувствительности экспрессного спектрального анализа для обнаружения ореолов ряда элементов используются другие, более чувствительные и обычно более дорогие аналитические методы. В связи с тем, что при геохимических поисках отбирается огромное число проб, экономический фактор при выборе методов их анализа приобретает решающее значение, чем, собственно, и определяется использование экспрессного спектрального анализа в качестве основного метода анализа геохимических проб. Благодаря многокомпонентному составу геохимических аномалий при их интерпретации обычно удается обходиться элементами-индикаторами, чувствительность экспрессного спектрального анализа на которые является удовлетворительной. В тех случаях, когда этих элементов недостаточно и возникает необходимость привлечения более дорогостоящих методов анализа, в целях сокращения затрат можно рекомендовать следующую последовательность аналитических работ: экспрессный спектральный анализ всех геохимических проб, оконтуривание геохимических аномалий и анализ более дорогостоящими методами только проб, попадающих в контуры геохимических аномалий, выявленных по результатам опережающего экспрессного спектрального анализа. Так, например, золоторудные месторождения (эндогенные) постоянно сопровождаются первичными ореолами не только золота, но и ряда его элементов-спутников (серебро, свинец, цинк, молибден и др.), ореолы которых с необходимой для целей геохимического прогнозирования надежностью оконтуриваются по результатам экспрессного спектрального анализа. Для обнаружения ореолов золота, как известно, используется более дорогой специальный метод анализа (спектро-химический). Очевидно, что существенное сокращение затрат будет достигнуто, если на золото анализировать не все пробы, а только отобранные из участков развития аномалий элементов-спутников.

Оконтуривание аномалий. Оконтуривание геохимических аномалий, как известно, производится по величинам

минимально-аномальных содержаний элементов-индикаторов, рассчитанных для каждой разности типичных для района исследований пород. Значение минимально-аномальных содержаний элементов определяется, исходя из величин основных параметров распределения элементов: среднего содержания (среднее арифметическое) и стандарта распределения содержаний — в случае нормального распределения содержаний элементов, а в случае логнормального распределения (наиболее характерного для микроэлементов) — среднего и стандарта распределения логарифмов содержаний элементов. Опыт использования первичных ореолов при поиске и разведке рудных месторождений позволяет рекомендовать оконтуривание геохимических аномалий по величине минимально-аномальных содержаний, рассчитанных с 5% -ным уровнем значимости (односторонний — 2,5%).

Учитывая большую чувствительность метода построения суммарных ореолов к обнаружению слабоконтрастных аномалий (фиксирующих, в частности, слепое оруденение), на первом этапе обработки результатов геохимического опробования рекомендуется построение общих суммарных ореолов в мультипликативной модификации как более простой в вычислениях. При этом используются элементы-индикаторы известных в районе месторождений. Укажем, что суммарные ореолы строятся только для элементов, образующих ореолы привноса. При этом элементы, образующие отчетливые ореолы выноса, естественно, должны быть исключены из числа элементов-индикаторов во избежание ослабления эффекта усиления аномалий, достигаемого в результате их суммирования. Оконтуривание мультипликативных аномалий также производится по минимально-аномальному значению произведения содержаний элементов-индикаторов, рассчитанному также для распространенных в районе пород по результатам геохимического опробования фоновых участков. Определение параметров фонового распределения элементов-индикаторов представляет определенные трудности, связанные прежде всего с выбором специальных фоновых участков. Обычно для этих целей выбираются участки за пределами известных месторождений, рудопроявлений и измененных пород. Однако это не всегда гарантирует чистоту выбранных участков: они могут быть заражены элементами-индикаторами оруденения, поскольку первичные ореолы ряда элементов, обладая значительными размерами, обычно распространяются за пределы измененных пород и визуально не могут быть обнаружены.

Учитывая изложенное, может быть рекомендован следующий, оправдавший себя на практике, способ определения параметров фонового распределения элементов-индикаторов:

— построение в изолиниях (градация в порядках десятичной шкалы) карты распределения в пределах исследованной площади значений произведений содержаний элементов-индикаторов с выделением в последующем наиболее вероятных фоновых участков,

которые характеризуются минимальными значениями произведений содержаний элементов: другой отличительной особенностью фоновых участков является более равномерное распределение этих значений по сравнению с геохимическими аномалиями, т. е. минимальное значение дисперсии;

— расчет минимально-аномальных значений произведений содержаний элементов-индикаторов по выбранным фоновым участкам с 5%-ным уровнем значимости и оконтуривание по этим значениям геохимических аномалий. Результаты площадного опробования коренных пород графически оформляются в виде геохимических карт, построенных на геологической основе. Прежде всего составляется карта размещений геохимических аномалий, на которой в изолиниях изображается распределение значений произведений содержаний элементов и на этой основе выделяются (по минимальным значениям) геохимические аномалии. Градация значений в пределах самих аномалий определяется их интенсивностью и обычно принимается в порядках десятичной шкалы. Опыт показывает, что удовлетворительная наглядность в графическом изображении результатов геохимического опробования достигается при построении карты размещения аномалий в том же масштабе, тогда как для интерпретации выявленных аномалий целесообразно строить карты изменения их параметров в более крупном масштабе. В случае геохимического опробования коренных пород в масштабе 1 : 10 000 удобнее всего для каждой аномалии строить карты в масштабе 1 : 5000.

Интерпретация геохимических аномалий. Критерии интерпретации геохимических аномалий, выявленных в результате опробования рудовмещающих коренных пород, вытекают из рассмотренных в предыдущих главах особенностей формирования первичных ореолов. При интерпретации геохимических аномалий последовательно решаются следующие основные задачи:

- определение формационной принадлежности оруденения;
- идентификации зон рассеянной рудной минерализации и первичных геохимических ореолов концентрированного оруденения;
- оценка уровня эрозионного среза;
- определение элементов залегания оруденения;
- оценка примерных масштабов оруденения.

Задача определения формационной природы геохимических аномалий в большинстве случаев решается на основе учета металлогенических особенностей исследованного района (типы развитых в районе месторождений), а также результатов структурно-минералогических наблюдений, выполненных в процессе геохимического опробования или последующего полевого осмотра аномалий (наличие характерных для отдельных типов месторождений минеральных ассоциаций и т. д.). В тех случаях, когда в пределах выявленных аномалий рудная минерализация

не обнаружена (аномалии могут быть надрудными, перспективными на слепое оруденение), может быть использован метод аналогий — сравнение выявленных аномалий с ореолами известных в районе месторождений. При отсутствии подобных месторождений для указанной цели могут быть использованы ряды поперечной зональности элементов-индикаторов, приведенные выше (см. табл. 21). В ряде случаев достаточно надежным критерием определения типа рудной минерализации могут служить абсолютные значения средних содержаний элементов-индикаторов в геохимических аномалиях. Так, например, среднее содержание свинца — элемента-индикатора многих рудных месторождений — в первичных ореолах ртутных месторождений на любых сечениях практически не превышает 0,01%, тогда как в ореолах полиметаллических месторождений достигает сотых и десятых долей процента. Среднее содержание ртути в ореолах полиметаллических месторождений обычно не превышает $1 \cdot 10^{-4}\%$, а на собственно ртутных и сурьмяно-ртутных месторождениях составляет тысячные и сотые доли процента. Приведенные примеры показывают, что такими индикаторами типа минерализации в первую очередь служат элементы, являющиеся основными компонентами руд.

При интерпретации геохимических аномалий, в частности, определении их формационной принадлежности, должна быть учтена возможность встречи полиформационных аномалий. Во многих случаях возможность встречи при поисковых работах полиформационных геохимических аномалий достаточно надежно определяется металлогеническими особенностями исследуемых районов: появление подобных аномалий наиболее вероятно в районах развития различных рудных формаций, в особенности на участках стыка рудных полей разных по возрасту и составу месторождений. В ряде случаев полиформационная природа геохимических аномалий может быть установлена в результате детальных структурно-минералогических наблюдений, позволяющих выявить на поверхности признаки появления рудных формаций и, в частности, их характерные минеральные ассоциации. Однако в тех случаях, когда рудные тела одной из этих формаций слепые, надежная расшифровка аномалий требует привлечения дополнительных критериев, поскольку минералогические признаки слепого оруденения на поверхности могут быть не зафиксированы. В качестве таких критериев могут быть использованы и геохимические, вытекающие из особенностей развития полиформационных ореолов.

Как уже отмечалось, ореолы вокруг рудных тел каждой рудной формации в соответствии с составом руд характеризуются специфическим набором элементов-индикаторов. Это означает, что появление аномалий элементов, не свойственных известной рудной формации, должно рассматриваться как признак возможного проявления другой формации. Для определения полиформационной природы исследуемых аномалий могут быть

использованы также сквозные элементы-индикаторы, типоморфные для ряда рудных формаций. В этом случае могут быть использованы соотношения размеров (ширины) ореолов этих элементов, разные для разных по составу месторождений. Так, например, на всех изученных нами урановых месторождениях максимальны по размерам ореолы урана (подвижного), в которые вписываются ореолы его элементов-спутников. Очевидно, что обратное соотношение размеров ореолов этих элементов-индикаторов должно рассматриваться как возможный признак полиформационных аномалий.

При расшифровке полиформационных аномалий может быть использован также корреляционный анализ. Как уже отмечалось, в первичных ореолах, связанных с проявлением одной рудной формации, между содержаниями элементов-индикаторов выявляется, как правило, значимая положительная связь. В случае полиформационных ореолов связь между содержаниями элементов-индикаторов разных формаций в основном отрицательная. После того, как определена формационная природа аномалии, необходимо убедиться, что выявленная аномалия действительно обусловлена концентрированным оруденением, а не представляет собой зону рассеянной рудной минерализации. Для решения этой задачи используется критерий геохимической зональности. Зоны рассеянной минерализации отличаются от первичных ореолов концентрированного (промышленного) оруденения отсутствием отчетливой геохимической зональности в строении мультипликативных аномалий и, как следствие, строго определенными значениями мультипликативного коэффициента геохимической зональности.

Одним из важнейших компонентов интерпретации геохимических аномалий является оценка уровня их эрозионного среза. Отметим, что речь идет об уровне выявленной на поверхности аномалии относительно оруденения, с которым данная аномалия связана. Очевидно, что этот уровень в общем случае не будет совпадать с абсолютным уровнем эрозионного среза участка развития аномалии. При интерпретации геохимических аномалий следует иметь в виду, что геохимическим опробованием обычно выявляются сложно построенные аномалии, образовавшиеся в результате совмещения в пространстве ореолов, сопровождающих более или менее изолированные рудные тела. При этом уровень эрозионного среза ореолов каждого из этих тел может быть резко различным, в связи с чем в пределах общей аномалии должны быть выделены вероятные элементарные аномалии (аномалии, сопровождающие отдельные рудные тела) с последующей оценкой уровня эрозионного среза каждой из них в отдельности. Элементарные аномалии обычно легко фиксируются центрами аномалий элементов-индикаторов и в первую очередь основных компонентов данного типа оруденения. Подобный дифференциальный подход к интерпретации геохимических аномалий тем более необходим, что часто в непосредственной близости от

слепого и слабозеродированного оруденения встречаются подрудные ореолы или же ореолы, развитые на уровне корневых частей практически полностью эродированных рудных тел.

В качестве критерия оценки уровня эрозионного среза геохимических аномалий используется подробно рассмотренная выше осевая зональность ореолов. Для этой цели обычно используются величинами отношения средних содержаний и продуктивностей ореолов пар элементов, а также отношениями параметров частных суммарных ореолов. При этом в числителе значится параметр ореолов надрудных элементов, а в знаменателе — подрудных и в ряде случаев элементов — основных промышленно ценных компонентов руд. Выбор надрудных и подрудных элементов, как уже отмечалось, производится по результатам изучения первичных ореолов известных (эталонных) месторождений, и, в частности, на основе рядов элементов-индикаторов вертикальной зональности (см. табл. 20).

Оценка уровня эрозионного среза аномалий производится путем сравнения величин указанных выше параметров с такими ореолов известных рудных тел той же рудной формации. При оценке уровня эрозионного среза геохимических аномалий более надежно использование параметров мультипликативных ореолов, поскольку их зональность более контрастна и, что особенно важно, и является единой количественно. Последнее выражается в близости величин индикаторных отношений параметров частных мультипликативных ореолов, рассчитанных для адекватных сечений ореолов месторождений одной или близких по составу рудных формаций.

Известно, что первоначально изучение первичных геохимических ореолов в основном было направлено на разработку методики поисков по ним слепых рудных тел, и поэтому не случайно, что первичные ореолы обычно рассматриваются только в связи с поисками слепого оруденения. Однако, как было показано при описании зональности ореолов, в строении ореолов является контрастная зональность не только при сопоставлении их надрудных и подрудных сечений, но и различных срезов ореолов, развитых на уровне рудных тел. Это означает, что вертикальная зональность первичных ореолов может быть использована как для отличия надрудных ореолов от подрудных (поиски слепого оруденения), так и для оценки глубины эрозионного среза выведенных на поверхность рудных тел. Последнее является главнейшим компонентом оценки перспективности рудопроявлений на глубину, что чрезвычайно важно, так как практически в каждом рудном районе известны многочисленные рудопроявления, требующие разбраковки с целью выбора из них наиболее перспективных.

Известно, что разведка признанных перспективными геохимических аномалий будет существенно облегчена, если известны условия залегания предполагаемого оруденения: его падение и склонение. Для определения поведения оруденения на глубине,

наряду с другими данными (геологоструктурными и т. д.), успешно могут быть использованы геохимические и, в частности, поперечная и продольная зональности первичных ореолов. Отметим, что использование геохимических критериев при решении указанной задачи особенно важно в случае слепого оруденения, когда геологоструктурные наблюдения не всегда являются достаточно информативными. Оценка масштаба прогнозируемого оруденения представляет собой одну из наиболее сложных задач интерпретации геохимических аномалий. Разбраковка зон рассеянной рудной минерализации с помощью рассмотренных выше критериев по существу представляет собой первую ступень процедуры определения вероятного масштаба оруденения, прогнозируемого по результатам литохимического опробования. В настоящее время мы еще не располагаем апробированными критериями решения этой задачи, поэтому приводимые ниже рекомендации должны быть применены с определенной осторожностью, с обязательным учетом конкретных геологоструктурных условий локализации оруденения. При оценке вероятного масштаба слепого оруденения по параметрам надрудных (перспективных на слепое оруденение) геохимических ореолов может быть использована установленная на примере изучения месторождений ряда рудных формаций прямая связь параметров рудных тел и окаймляющих их первичных ореолов, рассмотренная выше в главе III.

Оценка масштаба руд о п р о я в л е н и й обычно производится исходя из параметров выведенного на эрозийную поверхность оруденения. Из геохимических критериев при решении этой задачи наиболее эффективно использование зональности первичных ореолов для оценки уровня эрозийного среза аномалий и корректировка на этой основе глубины «подвески» запасов при оценке прогнозных запасов. В качестве примера поисков слепого оруденения по геохимическим ореолам ниже рассматриваются результаты работ, выполненных на участке Северо-Запад II, расположенном в западной части Канимансурского рудного поля (Центральный Карамазар, Средняя Азия). На этом участке по результатам геохимического опробования коренных пород (кварцевые порфиры, сфалерит-порфиры) в масштабе 1 : 10 000 выявлены контрастные геохимические аномалии бария, свинца, серебра, меди, висмута, кобальта и других элементов, характерных индикаторов типичного для данного района полиметаллического оруденения, с глубиной обычно переходящего в медно-висмутное. На рис. 137 изображены частные аддитивные ореолы надрудных (барий, свинец, серебро) и подрудных элементов (медь, висмут, кобальт), выбор которых произволился исходя из ряда зональности элементов-индикаторов (см. табл. 20), установленного по результатам изучения особенностей развития первичных ореолов вокруг рудных тел известных в районе месторождений и, в частности, месторождения Восточный Канимансур.

В данном случае использованы аддитивные ореолы, поскольку метод построения мультипликативных ореолов, который дает более четкие результаты, был предложен позже. Развитие более интенсивных аномалий надрудных элементов (по сравнению с подрудными) позволило считать, что на участке, по всей

Рис. 137. Аддитивные ореолы (поверхность участка Северо-Запад-II)

1-4 — первичные ореолы (4 — поля максимальной интенсивности ореолов); 5 — профили опробования и буровые скважины

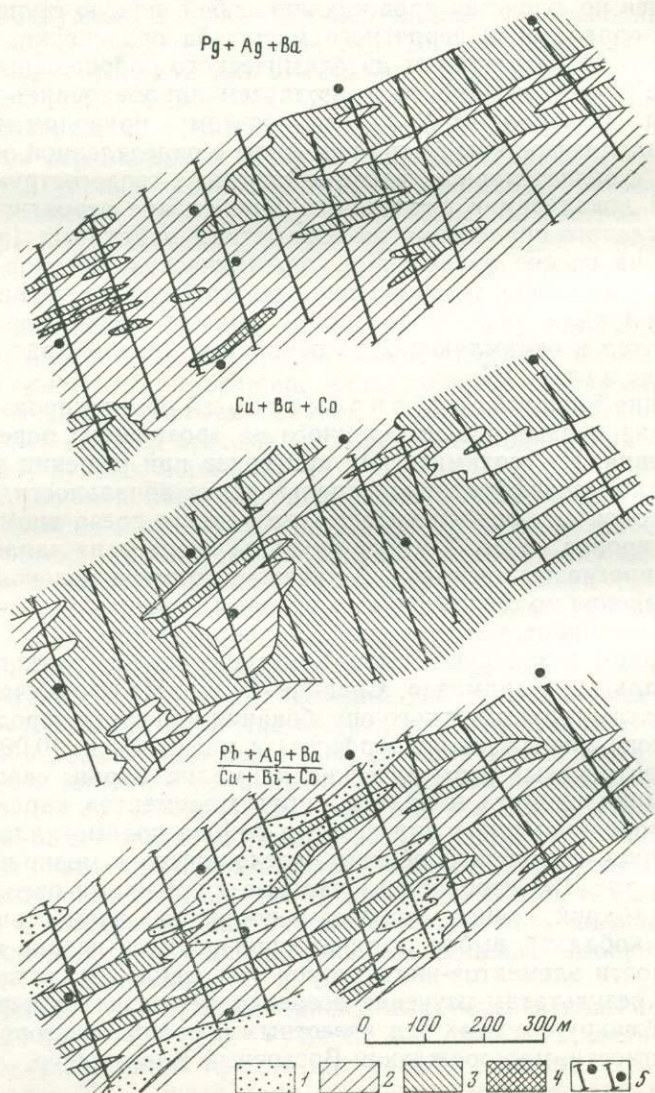


Таблица 32. Величины отношения линейных продуктивностей частных аддитивных ореолов

Участок	Профиль	$\frac{\text{Ba}+\text{Pb}+\text{Ag}}{\text{Cu}+\text{Bi}+\text{Co}}$
Северо-Запад II	I	14,4
	II	14,3
	III	19
	IV	16,1
Эталонный разрез, Восточный Канимансур		16,8

вероятности, выявлены надрудные ореолы полиметаллического оруденения. Этот вывод подтвержден расчетом отношения линейных продуктивностей частных суммарных ореолов (табл. 32; для сравнения приведена величина этого отношения для надрудных ореолов, выявленных по опорному разрезу через слепое оруденение месторождения Восточный Канимансур).

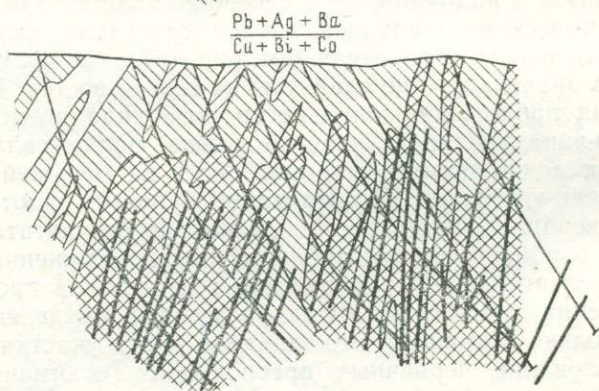
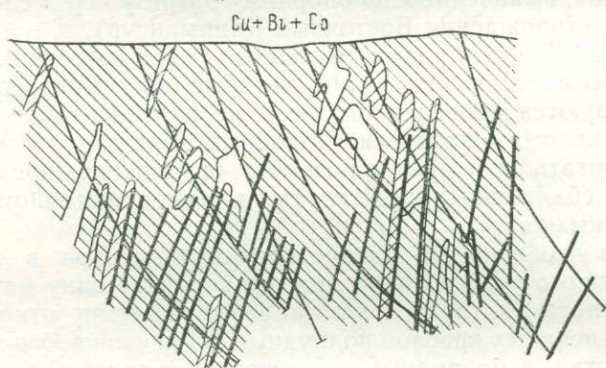
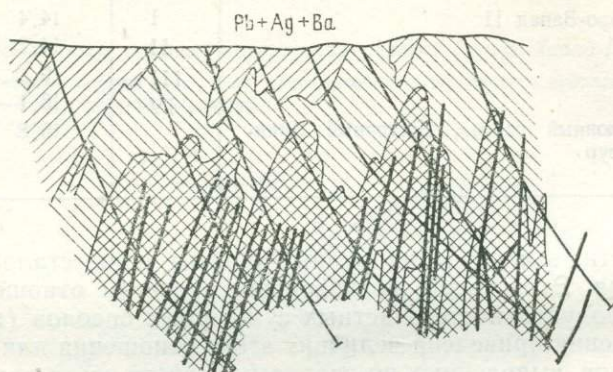
На рис. 137 виден ряд вытянутых в северо-восточном направлении геохимических аномалий, которые еще более отчетливо иллюстрируются приведенной здесь же картой изменения величин аддитивного показателя. Подобный характер аномалий позволил считать, что предполагаемое оруденение представляет собой ряд сближенных и вытянутых в северо-восточном направлении рудных тел.

Анализ особенностей распределения элементов в пределах исследованного участка позволил выявить еще одну интересную закономерность, которая заключалась в развитии относительно более интенсивных ореолов подрудных элементов в юго-западной части участка, а надрудных — в северо-восточной. Эта продольная геохимическая зональность более отчетливо фиксируется картой аддитивного показателя (см. рис. 137), где поля его максимальных значений резко сдвинуты на северо-восток. Подобная асимметрия продольной зональности позволила предположить, что в юго-западной части участка смена полиметаллического оруденения медно-висмутовым произойдет на меньшей глубине, чем в северо-восточной. Последующие буровые работы полностью подтвердили рекомендации, данные по результатам геохимического опробования: на глубине вскрыты сближенные в пространстве слепые полиметаллические рудные тела промышленного значения (рис. 138). Медно-висмутовое оруденение было вскрыто только в крайней юго-западной части участка.

Использование первичных ореолов и их геохимической зональности весьма эффективно также при поисках слепых рудных залежей в процессе поискового и разведочного бурения, когда результаты опробования керна пробуренных скважин позволяют существенно корректировать направление последующих поиско-

Рис. 138. Аддитивные ореолы (разрез, участок Северо-Запад-11)

1 — рудные тела; 2 — 4 — аддитивные ореолы (4 — поля максимальной интенсивности);
5 — буровые скважины



0 50 100 м



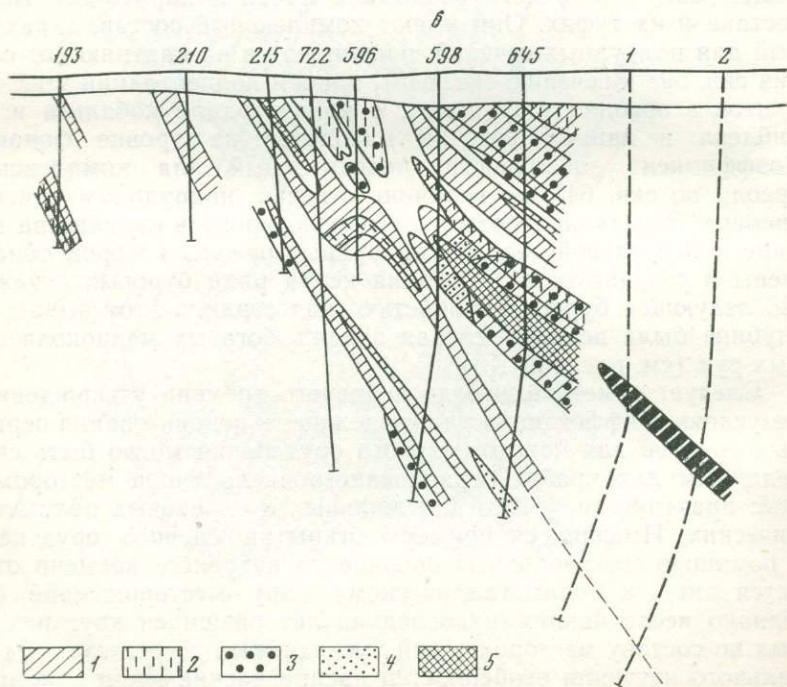
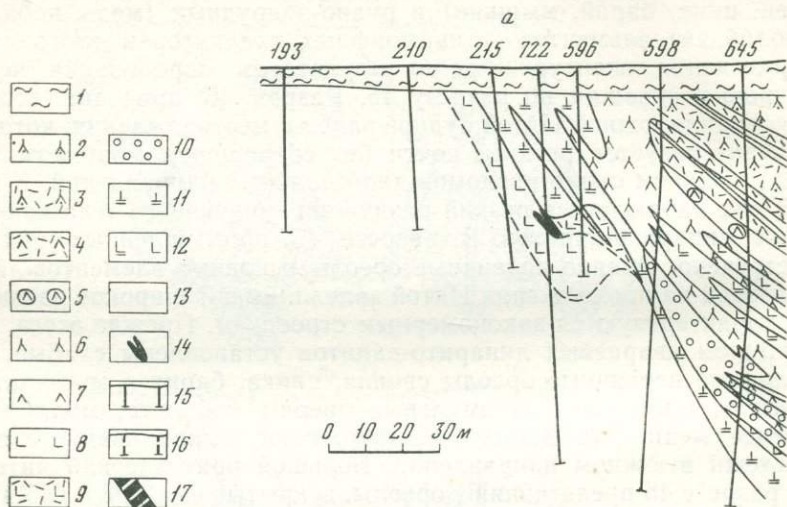
вых и разведочных работ. В качестве примера ниже по данным В. М. Рыфтина описываются результаты геохимического опробования, выполненного на Гайском медноколчеданном месторождении. Особенности состава и строения первичных ореолов этого месторождения описаны в главе I.

На рис. 139 изображены первичные ореолы надрудных (свинец, цинк, барий, мышьяк) и рудно-подрудных (медь, кобальт, молибден) элементов — типоморфных индикаторов этого типа оруденения, оконтуренных по результатам опробования керна буровых скважин по разрезу 45. Разрез 45 проходит вблизи окончания южной Пятой рудной залежи месторождения, которая характеризуется резким, почти без сокращения мощности, выклиниванием около разломов диагональных направлений. К югу от них наблюдается резкий раздув экранирующего тела кварцевых липарито-дацитов. В разрезе 45 промышленных руд не встречено. Однако первичные ореолы основных элементов-индикаторов на продолжении Пятой залежи имеют широкое развитие и характеризуются закономерным строением. Прежде всего, под экраном кварцевых липарито-дацитов установлены слабые, локальные первичные ореолы свинца, цинка, бария и мышьяка и интенсивные, высокоаномальные ореолы кобальта, молибдена, менее меди. Эти данные подтверждают выклинивание Пятой залежи в южном направлении. Большой практический интерес в разрезе 45 представляют ореолы, вскрытые скв. 598 и 645 висящем боку Восточного разлома в лавах липарито-дацитового состава и их туфах. Они имеют комплексный состав, характерный для надрудных сечений, расширяются по падению (от сечения скв. 598 к сечению скв. 645), причем концентрации этих элементов в ореолах возрастают, а концентрации кобальта и молибдена в данном сечении находятся на уровне фоновых. Коэффициент зональности, подсчитанный для комплексного ореола по скв. 645, по величине отвечал надрудному сечению ореолов. Эти данные позволили прогнозировать наличие на глубине новой слепой залежи, надрудные ореолы которой обнаружены в результате опробования керна ряда буровых скважин. Последующее бурение полностью подтвердило этот вывод: на глубине была вскрыта слепая залежь богатых медноколчеданных руд (см. рис. 139).

Следует отметить, что до недавнего времени утверждение о безусловной эффективности и надежности использования первичных ореолов для поисков слепого оруденения могло быть справедливым для крайне ограниченного числа типов месторождений: практически только для жильных и скарновых полиметаллических. Имеющиеся примеры открытия слепого оруденения с помощью его первичных ореолов до недавнего времени относятся лишь к полиметаллическому типу месторождений [30]. Однако исследованиями последних лет расширен круг различных по составу месторождений, для которых по результатам детального изучения особенностей распределения элементов-инди-

каторов в околорудном пространстве доказана целесообразность и высокая эффективность использования при поисковых работах первичных ореолов и прежде всего их геохимической зональности.

Одними из наименее изученных и одновременно трудных для поисков по первичным ореолам являются золоторудные место-



рождения. Однако исследованиями последних лет установлено, что при поисках этих месторождений первичные ореолы могут быть использованы не менее успешно. Для иллюстрации этого положения приводится пример прогнозирования слепого оруденения в одном из золоторудных районов страны. В пределах рассматриваемого рудного поля оруденение локализуется в интенсивно дислоцированных терригенных породах триасового возраста, прорванных поздне меловыми дайками кислого состава. Рудами являются в разной степени окварцованные

Рис. 139. Комплексные первичные ореолы

a — геологический разрез: 1 — рыхлые мезо-кайнозойские отложения; 2 — плагиоклазовые порфириды; 3 — туфы плагиоклазовых порфиридов; 4 — спилитовые порфириды; 5 — туфобрекчии; 6 — габбро-диабазы и диабазовые порфириды; 7 — дайки диабазов; 8 — плагиоклазовые порфириды дацитового состава; 9 — туфы дацитового состава; 10 — туфобрекчии андезито-дацитового состава; 11 — кварцевые порфириды; 12 — нерасчлененные лавы липаритового и дацитового состава и их туфы; 13 — серицит-кварцевые и кварц-серицитовые породы, вторичные кварциты; 14 — известные рудные тела; 15 — опробованные буровые скважины; 16 — скважины, пробуренные после геохимического прогноза; 17 — рудная залежь, обнаруженная после проверки геохимического прогноза

b — содержание элементов (в %): 1 — цинка более 0,014; 2 — свинца более 0,04; 3 — бария более 0,01; 4 — мышьяка более 0,01; 5 — комплексный ореол перечисленных элементов

в — содержание элементов (в %): 1 — меди более 0,01; 2 — кобальта более 0,002; 3 — молибдена более 0,0005

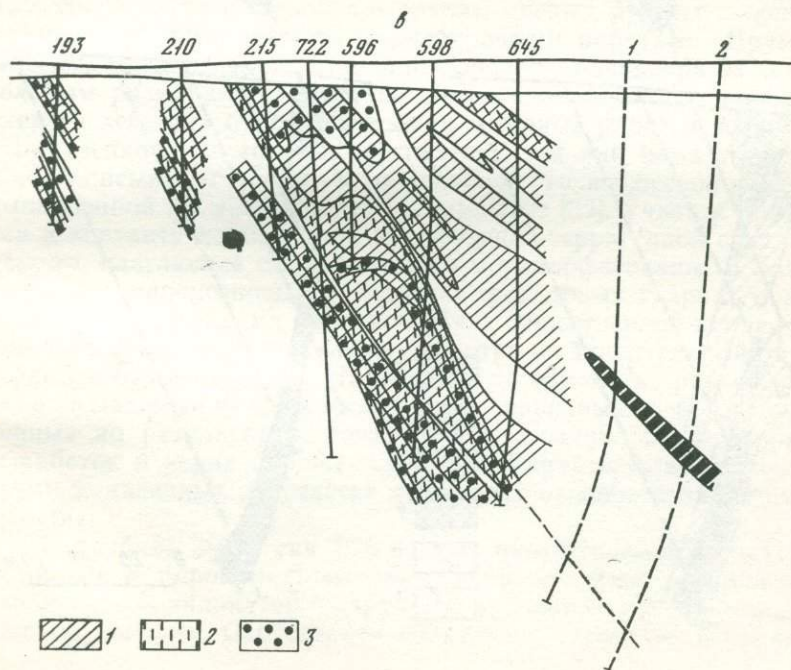
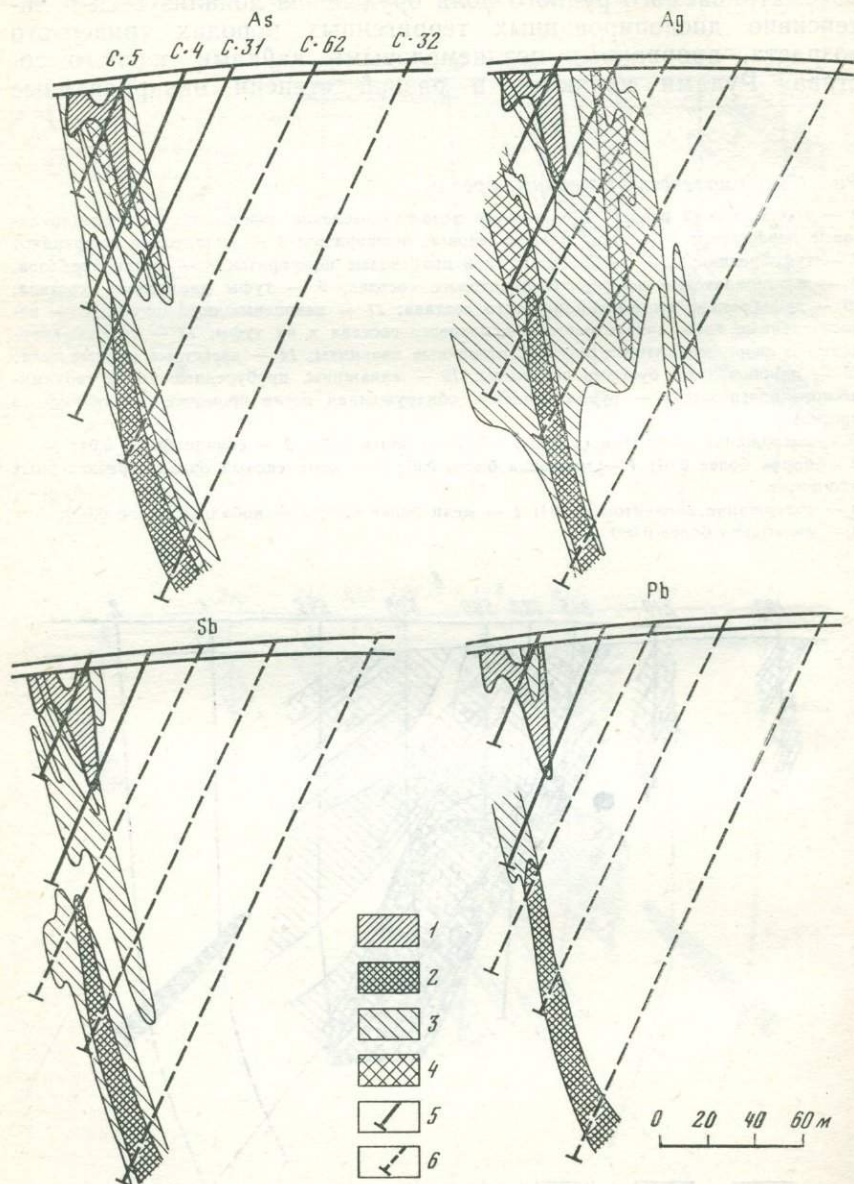


Рис. 140. Первичные ореолы золотого оруденения

1 — известное рудное тело; 2 — слепое рудное тело, открытое в результате проверки геохимического прогноза; 3, 4 — первичные ореолы элементов-индикаторов (4 — поля повышенных содержаний); 5 — скважины, пробуренные до геохимического опробования; 6 — скважины, пробуренные для проверки геохимического прогноза



алевролиты и песчаники с интенсивным микропрожилкованием и брекчированием с кварцевым цементом.

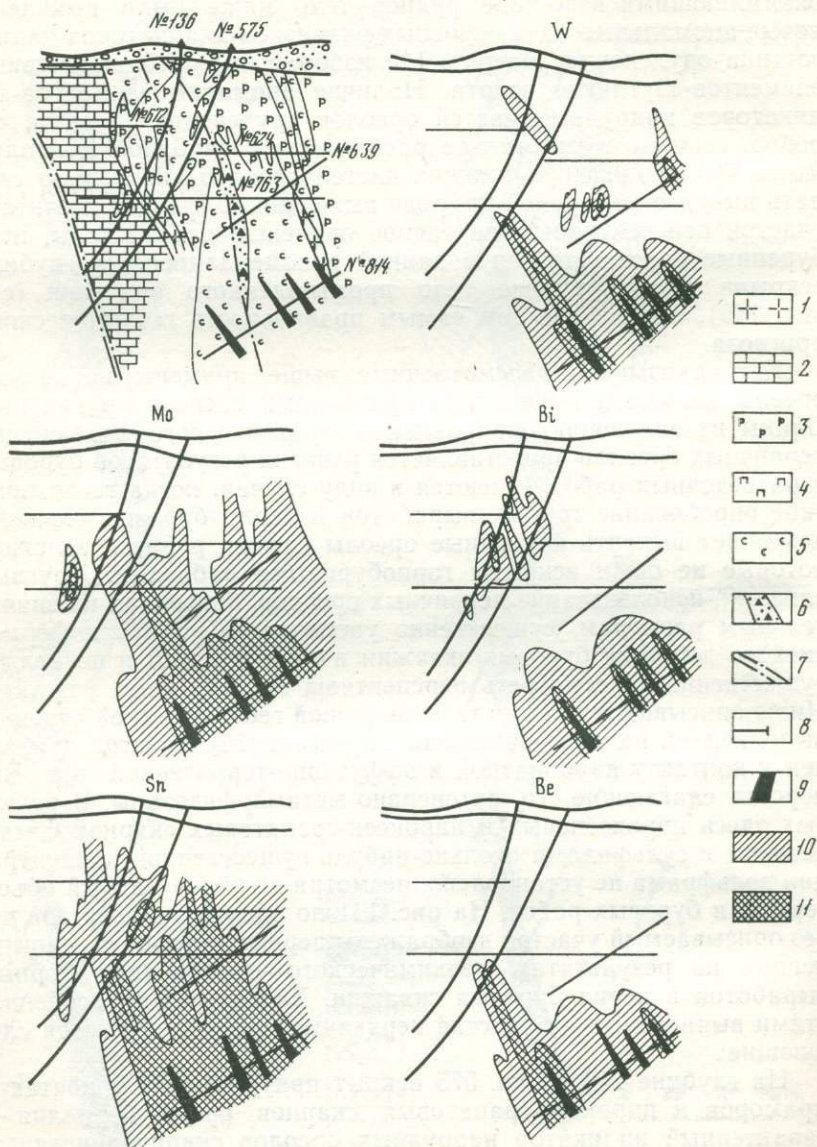
На одном из участков рудного поля буровыми скважинами установлено полное выклинивание с глубиной выходящего на поверхность рудного тела. Для оценки перспектив описываемого участка на слепое оруденение выполнено геохимическое опробование керн буровых скважин. В результате, наряду с ореолами, окаймляющими известное рудное тело, ниже были выявлены новые аномальные поля основных элементов-индикаторов данного типа оруденения. На рис. 140 изображены ореолы основных элементов-спутников золота. Наличие аномалий элементов-индикаторов надрудных частей ореолов оруденения (сурьма, серебро, свинец) и отчетливое расширение с глубиной аномалии мышьяка (индикатора нижних частей ореолов) позволило сделать вывод о надрудной природе выявленных ореолов и считать участок перспективным на слепое оруденение. Скважины, пробуренные в соответствии с данной рекомендацией, на глубине вскрыли слепое рудное тело промышленного значения (см. рис. 140), подтвердив тем самым правильность геохимического прогноза.

Как показывают рассмотренные выше примеры, первичные ореолы являются надежными признаками слепого оруденения. Одним из важнейших направлений практического применения первичных ореолов представляется ревизия результатов буровых и разведочных работ. Имеются в виду случаи, когда геохимическое опробование горных выработок и керн буровых скважин позволяет выявить первичные ореолы слепых рудных залежей, которые не были вскрыты горнобуровыми работами. Другими словами, использование первичных ореолов, благодаря их значительным размерам, существенно увеличивает радиус информативного действия буровых скважин и горных работ и позволяет существенно пересмотреть перспективы тех или иных участков. Ниже описываются результаты подобной геохимической ревизии, выполненной на месторождении Тырнауз [32]. Участок приурочен к контакту карбонатной и эффузивно-терригенной свит. Все породы, слагающие его, интенсивно метаморфизованы. В развитых здесь пироксеновых и пироксен-гранатовых скарнах с магнетитом и сульфидами сколько-нибудь существенной концентрации вольфрама не установлено, несмотря на значительный объем горных и буровых работ. На рис. 141 по одному из разрезов через описываемый участок изображены первичные ореолы, оконтуренные по результатам геохимического опробования горных выработок и керн буровых скважин. Характерными особенностями выявленных на участке первичных ореолов являются следующие:

На глубине 250 м скв. 575 вскрыт приуроченный к контакту мраморов и пироксен-гранатовых скарнов ореол бериллия — характерный индикатор надрудных ореолов скарново-шеелитового оруденения. Особенности состава и строения первичных

Рис. 141. Первичные ореолы элементов-индикаторов (разрез III—III, Северный участок, месторождение Тырнауэ)

1 — лейкократовые граниты; 2 — мрамора; 3 — роговики биотитовые; 4 — роговики пироксен-плагноклазовые; 5 — скарны; 6 — зоны дробления; 7 — дизъюнктивные нарушения; 8 — буровые скважины и горные выработки; 9 — слепые рудные тела, вскрытые в результате проверки геохимического прогноза; 10, 11 — первичные ореолы (11 — поля повышенных содержаний элементов)



ореолов скарново-шеелитового оруденения подробно описаны в главе III. Другим характерным индикатором надрудных сечений первичных ореолов скарново-шеелитового оруденения является олово, образующее контрастные ореолы по всему разрезу. С глубиной происходит отчетливое усиление ореолов олова (см. рис. 141). Наличие интенсивных ореолов надрудных элементов (бериллия и олова) позволило считать, что участок перспективен на слепое оруденение. Этот вывод подтвердили расчеты, показавшие, что величина мультипликативного коэффициента геохимической зональности (олово·бериллий/вольфрам·висмут) равняется 1,28, т. е. отвечает надрудному сечению первичных ореолов данного типа оруденения, что следует из рис. 72, на котором приведены совмещенные графики изменения с глубиной величин мультипликативного и аддитивного коэффициентов геохимической зональности первичных ореолов скарново-шеелитового оруденения. На основании этих данных сделан вывод о наличии вольфрамового оруденения на глубине 100—150 м ниже самого нижнего горизонта горных работ (2380 м) и рекомендована проверка бурением глубоких горизонтов исследованного участка. Первая же скважина (№ 814), пробуренная из квершлага № 12 штольни № 18 к югу под углом 45°, подсекла мощную (более 200 м) зону скарнов и метасоматитов с интервалами промышленного скарново-шеелитового оруденения (см. рис. 72).

Для дальнейшей корректировки разведочных работ на рассматриваемом участке были оконтурены ореолы элементов-индикаторов с учетом пробуренной скважины № 814. Как видно из рис. 141, ореолы всех элементов-индикаторов с глубиной усиливаются. Величина коэффициента геохимической зональности на уровне скв. 814 оказалась 1,07, что соответствует верхнеруднонадрудному уровню на эталонном разрезе (см. рис. 72). Это означает, что скв. 814 вскрыты верхние части слепого оруденения и разведка его на глубину должна быть продолжена.

При оценке результативности и эффективности поисков слепого оруденения по первичным ореолам обязательно следует учитывать не только эффективность методики в обнаружении рудных тел и месторождений (положительная оценка перспектив рудоносности исследованных участков), но и надежность идентификации и исключения из сферы последующих дорогостоящих проверочных работ бесперспективных геохимических аномалий (отрицательные оценки). Опыт выполненных в ряде рудных районов работ однозначно свидетельствует о высокой надежности использования геохимических критериев для разбровки бесперспективных геохимических аномалий, представленных нижнерудными и подрудными ореолами, а также многочисленными зонами рассеянной рудной минерализации. Для иллюстрации высокой надежности подобных отрицательных оценок можно привести результаты работ в Средней Азии, где из многочисленных признанных по результатам геохимического опробования бесперспективных участков (более 300), 28 проверено

горными и буровыми работами и во всех случаях оценка, данная по результатам геохимических работ, подтверждена, т. е. при проверке этих аномалий концентрированного оруденения не выявлено. Большое практическое значение первичных ореолов как критериев разбраковки бесперспективных геохимических аномалий станет очевидным, если учесть, что количество подобных аномалий значительно и существенно превосходит число перспективных на слепое оруденение надрудных геохимических ореолов.

Поиски слепого оруденения в пределах площадей, где коренные рудовмещающие породы покрыты плащом автохтонных (элювио-делювиальных отложений), возможны по вторичным ореолам рассеяния элементов-индикаторов, образующимся в результате гипергенного разрушения первичных ореолов. Очевидно, что поиски слепого оруденения по вторичным ореолам будут достаточно надежными только при условии, когда вторичные ореолы являются адекватными аналогами первичных, т. е. выявляется тесная корреляция в распределении элементов-индикаторов в первичных и вторичных ореолах. Степень соответствия первичных и вторичных ореолов в основном определяется конкретными ландшафтно-геохимическими условиями, контролирующими формирование вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов. В этой связи изучение соответствия первичных и вторичных ореолов в различных ландшафтно-геохимических условиях приобретает особую актуальность. Суммированные ореолы по сравнению с моноэлементными характеризуются более тесной и стабильной корреляцией, поэтому их практическое использование более надежно.

Отметим, что наиболее эффективным при геохимических поисках слепых месторождений является комплексное использование первичных и вторичных литохимических ореолов в следующей последовательности выполнения работ:

А. Составление карт районирования территории опоскования по условиям ведения поисков с выделением площадей, в пределах которых возможны поиски слепого оруденения по вторичным ореолам рассеяния элементов-индикаторов; такими будут площади, характеризующиеся удовлетворительной корреляцией первичных и вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов, т. е. площади, в пределах которых вторичные ореолы являются адекватными аналогами первичных;

Б. Площадное литохимическое опробование автохтонных отложений с целью выявления и оконтуривания вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов (в пределах площадей с удовлетворительной корреляцией первичных и вторичных ореолов);

В. Интерпретация выявленных вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов с использованием критериев, основанных на особенностях состава и строения первичных геохимических ореолов; с помощью этих критериев, как уже отмечалось, могут быть решены следующие основные задачи:

— определение типа (состава) слепого-перекрытого оруденения (по элементному составу ореолов и соотношению параметров ореолов элементов-индикаторов);

— оценка уровня эрозионного среза выявленных аномалий с целью отличия перспективных на слепое оруденение надрудных ореолов от подрудных (также отличия верхнерудных срезов от нижнерудных в случае обнаружения рудных тел и месторождений, вскрытых эрозионной поверхностью);

— разбраковка зон рассеянной рудной минерализации;

Г. Вскрытие канавами и геохимическое опробование коренных рудовмещающих пород в пределах признанных перспективными на слепое оруденение вторичных ореолов рассеяния элементов-индикаторов с целью уточнения оценки перспектив рудности участков по параметрам первичных ореолов и при подтверждении положительной оценки постановка проверочных горнобуровых работ.

Рассмотренная методика поисков слепых рудных тел и месторождений по вторичным литохимическим ореолам разработана сравнительно недавно, еще не получила широкого применения, поэтому в настоящее время не представляется возможной представительная оценка ее эффективности. Отметим только, что имеющиеся данные, явно недостаточные для окончательных выводов, свидетельствуют о высокой эффективности и надежности использования этой методики при поисках слепых месторождений.

2. В качестве примера поисков погребенного оруденения можно указать на работы, проведенные Ю. Е. Саетом и его сотрудниками на одной из девонских структур, геологически перспективной для выявления полиметаллического стратиформного оруденения в карбонатных породах. Породы фундамента здесь перекрыты неогеновыми глинами и четвертичными песками, мощностью до 30 м. Проведенные работы позволили выявить протяженную зону аномалий тяжелых металлов в почвах с содержаниями $(50-200) \cdot 10^{-5}\%$ при фоне $(20-25) \cdot 10^{-5}\%$. Вся зона аномалий в целом строго локализована над потенциально-продуктивными горизонтами пород девона. Буровая проверка трех центров высоких содержаний элементов-индикаторов в почвах позволила выявить на глубине полиметаллическое оруденение, подтвердив правильность геохимического прогноза. Методика поисков погребенных месторождений по газовым ореолам еще не нашла широкого практического применения, поэтому в настоящее время можно говорить лишь о значительных потенциальных возможностях этой методики. Оценка ее реальной эффективности представляет собой задачу будущих исследований.

3. Слепо-погребенные месторождения. Месторождения этой группы являются наиболее сложными для поисковых работ, а также для последующего освоения горнорудной промышленностью вследствие их глубокого залегания. Задача

поисков подобных рудных залежей обычно возникает в пределах действующих горнорудных предприятий, где отработка глубоко-залегающего оруденения экономически оправдана. Вопросы геохимических поисков слепо-погребенных месторождений разработаны крайне недостаточно. В связи с этим речь пойдет только о принципиальной возможности и целесообразности использования при поисках слепо-погребенных месторождений тех или иных методических приемов, вытекающих из современного состояния теории и практики геохимических поисков и базирующихся на единичных примерах реализации на практике рекомендуемых методик. Представляется, что при поисках слепо-погребенных месторождений в принципе применима рассмотренная выше для поисков погребенных месторождений методика геохимических работ. Как и при поисках погребенных месторождений, с помощью геохимического опробования по методу наложенных ореолов рассеяния элементов-индикаторов, а также газовых ореолов рассеяния, выделяются перспективные на слепо-погребенное оруденение участки. Подобная рекомендация основана на рассмотренных выше примерах развития отчетливых наложенных эпигенетических ореолов рассеяния элементов-индикаторов не только над погребенными, но и слепо-погребенными месторождениями (см. рис. 47, 48).

Дальнейшая оценка выявленных аномалий, как и в случае погребенных месторождений, потребует вскрытия и опробования коренных рудовмещающих пород для обнаружения и интерпретирования первичных геохимических ореолов. Теоретически при поисках слепо-погребенного (как и погребенного) оруденения возможно применение биогеохимического метода (при поисках слепого оруденения успешно применяются литохимические методы и с ними биогеохимический метод вряд ли сможет серьезно конкурировать). Многолетние исследования по использованию биогеохимического метода для поисков рудных месторождений до настоящего времени по существу не вышли из стадии экспериментов и опытно-методических работ. Особенности формирования геохимических ореолов в растениях в подавляющем большинстве случаев изучались в районах известных рудных месторождений с хорошо выраженными вторичными литохимическими ореолами рассеяния, т. е. в условиях почти всегда очевидного в практическом отношении преимущества литохимических методов. В то же время совершенно недостаточно данных для определения таких ландшафтно-геохимических условий, где применение биогеохимических методов имело бы неоспоримые преимущества перед другими геохимическими методами. Представляется, что наибольшего внимания в этом отношении заслуживают районы, перекрытые мощными аллохтонными отложениями, а также площади развития закрытых дефлюционных ореолов рассеяния элементов-индикаторов. Однако биогеохимические исследования в таких районах проводились в недостаточных объемах и убедительных результатов не дали.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ— ИНДИКАТОРЫ ГЕНЕЗИСА ОРУДЕНЕНИЯ

МЕХАНИЗМ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ОРЕОЛОВ

Общие положения

Геохимические поиски рудных месторождений опираются на законы миграции химических элементов в земной коре, а также на общие закономерности процессов рудообразования и формирования рудных тел. Поиски по первичным геохимическим ореолам основаны на обязательном наличии в связи с любым месторождением гипогенного ореола не только промышленного металла, но и металлов-спутников и на не менее обязательном закономерно зональном строении этого ореола. Поиски по вторичным ореолам, а также гидрохимическими и биогеохимическими методами основаны на гипергенном разрушении рудных месторождений и, что особо важно, их первичных ореолов, на закономерностях миграции рудных компонентов в водной среде, законах их поведения в условиях гидросферы и биосферы. Атмохимические методы связаны с миграцией газов различного состава и происхождения по газопроницаемым трещинам, входящим в системы рудоконтролирующих разломов.

В основе теории геохимических методов поисков рудных месторождений лежит концепция, рассматривающая процесс образования месторождений как единственно возможный переход металлов от рассеянного состояния в земной коре и мантии к концентрированному с многоступенчатой дифференциацией при этом, что приводит к обязательному наличию первичных геохимических ореолов. Возникновение вторичных гипергенных ореолов рассеяния, связанное с разрушением месторождений и их первичных ореолов, является единственно возможным обратным процессом — переходом, также дифференциальным, от концентрации вновь к рассеянию. И в том, и другом случае дифференциация металлов никогда не бывает полной и главный металл сопровождается значительным числом металлов-спутников.

Рудные месторождения весьма разнообразны по своему происхождению, геологическим условиям образования и нахождения, по минеральным парагенезисам, геохимическому спектру металлов и их спутников, возрасту, составу и свойствам вмещающих пород, размерам промышленных тел, концентрациям полезных компонентов и прочему. Однако такое множество раз-

личий, хотя и затушевывает, но не может скрыть то общее, что характеризует в целом процесс рудообразования, определяет его сущность, отличает от других геологических процессов. К общим принципиальным положениям, которые определяют теоретическую возможность создания геохимических методов поисков, относятся следующие.

При первичном распределении вещества планеты экономически важные металлы не образовывали, подобно горным породам, скопления в земной коре, а были рассеяны в слагающих ее толщах. Для образования любого рудного месторождения, независимо от его типа, генезиса и геологических условий нахождения, таким образом, было необходимо вторичное перераспределение этих металлов с обязательным переходом от их рассеяния к концентрации. При большом разнообразии механизмов экстракции, транспортировки и отложения, разнообразии источников металлов, переносающей среды и источников энергии смысл процесса рудообразования остается всего один и тот же: переход металлов из рассеянного состояния к концентрации, к накоплению. В процессе рудообразования осуществляется непрерывная многоступенчатая дифференциация металлов, приводящая в конечном итоге к образованию преимущественно промышленно-металлических месторождений. Однако главный металл всегда сопровождается большим числом металлов-спутников, металлов-примесей как способных в иных условиях образовать собственные месторождения, так и рассеянных, не имеющих в природе индивидуализированных промышленных скоплений. Наличие таких металлов-спутников, сопровождающих главный металл в рудообразующем растворе и отличающихся большим диапазоном своих свойств, — один из существенных факторов, определяющих возможность поисков глубокозалегающих рудных тел и месторождений.

В области рудоотложения рудообразующие растворы при своем движении охватывают значительные пространства, просачиваясь через объемы горных пород, во много раз превышающие объемы промышленных рудных тел, образующихся при этом. В соответствующий момент выпадения осадка из растворов отложение рудного вещества происходит во всем объеме обрабатываемого пространства. При возникновении участков промышленной концентрации в предпочтительном привносе рудного вещества в них всегда сохраняется невозможность отложения всего материала в одной точке при полном завершении концентрации металла, с четким разграничением руды и вмещающей породы. В месторождениях любого типа и происхождения, вплоть до осадочных, всегда будет создаваться вокруг и в связи с промышленными рудными телами зоны распространения слабых концентраций осаждающихся металлов, которые мы привыкли сейчас называть первичными геохимическими ореолами.

Рудные тела и первичный геохимический ореол представляют единое целое, границы между ними зачастую определяются

только экономически, по результатам опробования. Первичные ореолы пространственно и генетически связаны с окологрудными гидротермально измененными породами, но по размерам они всегда превышают зону окологрудных изменений, достигая только в доступной наблюдению части их объема 1—10 км³ и более; в них сосредоточиваются главные запасы металлов.

Геологические условия образования ореолов

Геолого-геохимические условия, определяющие тип ореола, его размеры и форму, внутреннее строение и характер зональности и, тем самым определяющие глубинность поисков и их высокую эффективность, подразделяются на внешние (геологические) и внутренние (геохимические). Среди геологических условий кардинальное значение имеют следующие:

— геологическое строение рудного поля, размеры и форма рудных тел и их протяженность по вертикали;

— элементы дизъюнктивной тектоники: форма, размеры, плотность распространения и условия залегания рудоподводящих, рудораспределяющих, рудоконтролирующих структурных элементов, элементов дорудной тектоники вообще;

— наличие даек, их размеры, плотность насыщения, элементы залегания, возрастные соотношения с рудными телами;

— условия залегания рудных тел, их структурно-тектонические и возрастные взаимоотношения с вмещающими и покрывающими породами;

— физические свойства рудовмещающих, подстилающих и покрывающих пород, их пористость и проницаемость, степень трещиноватости рудного поля, отдельных его блоков и зон;

— литологический и химический состав вмещающих, подстилающих и покрывающих пород, степень их изменения.

— направление движения растворов относительно горизонта напластования вмещающих пород, залегания рудных тел, элементов трещинной тектоники и даек;

К главным геохимическим условиям относятся:

— состав рудо- и ореолообразующего раствора, спектр металлов и их концентрация;

— физико-химические условия среды отложения: T^0 , P , pH , Eh ;

— зональность ореола и степень ее контрастности, факторы, определяющие параметры зонообразующей осадочно-хроматографической колонки, ее сжатость или растянутасть;

— прочее особенности механизма ореоло- и рудообразования.

Следует остановиться в первую очередь на некоторых наиболее существенных геологических факторах, разнообразии и различное взаимосочетание которых определяет ту или иную степень глубинности геохимических методов поисков по гипогенным первичным ореолам. Достаточно очевидно, что чем больше размеры первичных геохимических ореолов, т. е. чем дальше от

рудного тела будут распространены ассоциации ореольных элементов-индикаторов, тем больше возможная глубина обнаружения этого рудного тела. Размеры ореолов и их морфология в первую очередь определяются той структурно-геологической обстановкой, в которой происходит ореоло- и рудообразование. Поскольку поисковой основой здесь является контрастно зональ-

Рис. 142. Фронтальный (I) и кинжальный (II) варианты направления движения растворов и ориентации зональности первичных ореолов

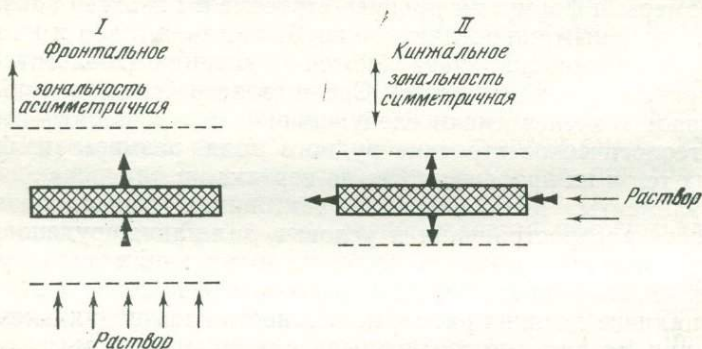
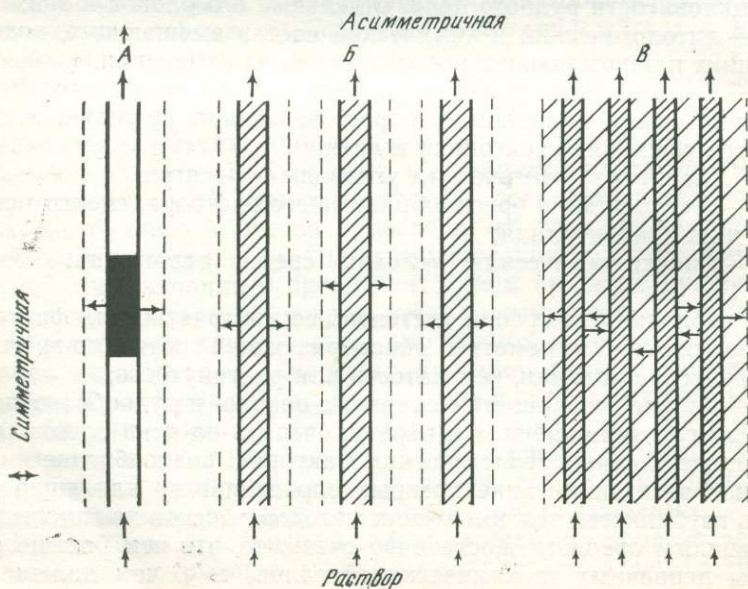


Рис. 143. Кинжальный вариант вертикального движения растворов (А) и его усложнение в системах близких трещин (Б) до образования единых рудных зон со сложным внутренним строением (В)



ное распределение элементов-индикаторов в ореоле с резким различием тыловых (подрудных) и фронтальных (надрудных) ассоциаций элементов-индикаторов, важнейшее значение для глубинности поисков приобретает такой первостепенный параметр, как направление движения растворов как относительно горизонта, так и той конкретной структурно-геологической обстановки, в которой осуществляется рудоотложение.

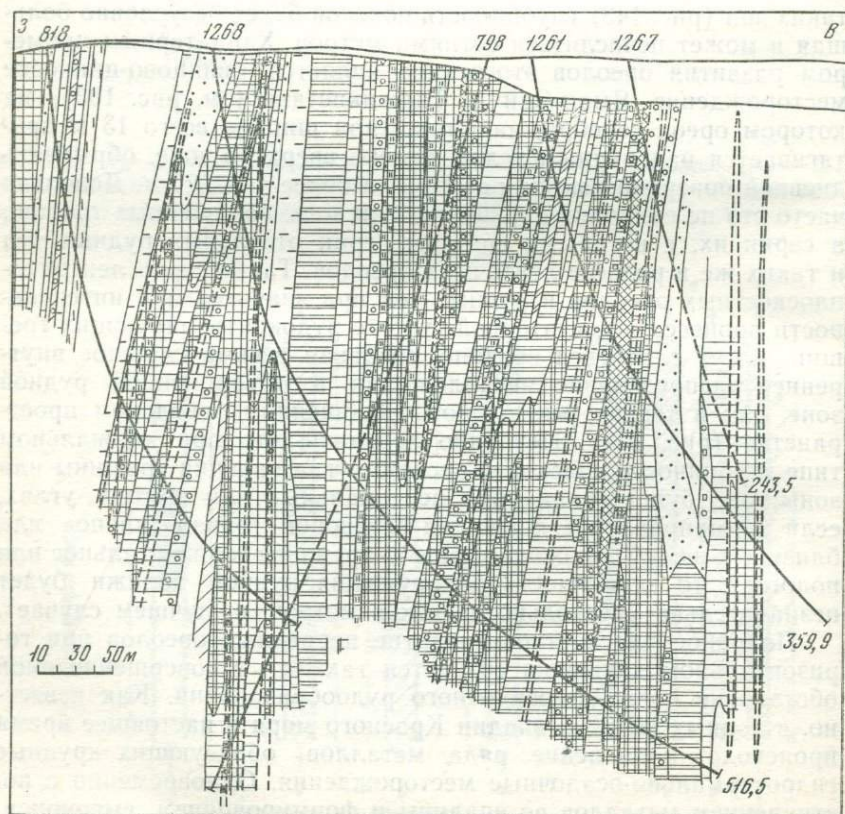
В первую очередь следует указать на то, что кинжальное, или фронтальное (рис. 142), проникновение рудообразующего раствора в зону рудоотложения обуславливает образование резко различных морфогенетических типов не только рудных тел, но и первичных ореолов. В первом случае в результате просачивания растворов по узким ослабленным зонам или простой циркуляции по открытым трещинам образуются также узкие плоско-вытянутые ореолы в связи с зонами расщелачивания с промышленной вкрапленностью или жильными рудными телами. В поперечном сечении ширина ореолов весьма невелика, но зато распространение элементов-индикаторов в пределах самой трещинной зоны очень значительно и при крутом падении таких зон (рис. 143) глубинность поисков будет безусловно большая и может исчисляться сотнями метров. Характерным примером развития ореолов этого типа является свинцово-цинковое месторождение Яман-Сай в Таджикистане (см. рис. 103), на котором ореол серебра, например, при ширине всего 13 м протягивается над рудным телом далеко вверх по зоне, обрываясь дневной поверхностью на расстоянии более чем 320 м. Довольно часто это не единичные трещины, или зоны сближенных трещин, а серии их, с которыми связаны серии отдельных рудных тел и таких же в разрезе ленточных ореолов. Такие серии ленточно-плоскостных ореолов и рудных тел при значительной интенсивности процесса и достаточной густоте рудоконтролирующих трещин, могут сливаться воедино, создавая весьма сложное внутреннее распределение металлов как в объединенной рудной зоне, так и теперь уже едином, обобщенном ореольном пространстве (рис. 144). Нетрудно заметить, что при кинжальном типе глубинность поисков зависит от угла падения трещины или зоны; она будет велика при вертикальных или крутых углах, если же направление движения растворов горизонтальное или близкое к нему (положение зоны — трещины горизонтальное или пологое), то глубинность обнаружения рудной залежи будет незначительна (несколько десятков метров в лучшем случае).

Подобное плоскостное развитие первичных ореолов при горизонтальном движении создается также и в совершенно иной обстановке подводно-осадочного рудообразования. Как известно, в донных осадках впадин Красного моря в настоящее время происходит накопление ряда металлов, образующих крупные гидротермально-осадочные месторождения. Одновременно с поступлением металлов во впадины и формированием высококон-

центрированных рудных скоплений происходит и их рассеяние, т. е. ореолообразование [96]. С конца вюрмского оледенения, примерно за 100 тысяч лет, в донных осадках осевой долины Красного моря в результате такого рассеяния на протяжении более 10 км образовался ореол с контрастной зональностью (от тыла к фронту): Fe — Zn — Mn — Cu — Hg, совпадающий с зональностью первичных ореолов сульфидных эндогенных месторождений (рис. 145). Установлено также, что концентрации этих металлов в осадках Красного моря возрастают от шельфа в направлении центральной части осевой долины, что указывает также и на значительную ширину создающегося ореола. Это открывает хорошие перспективы поисков стратиформных месторождений, особенно в складчатых областях, где их глубинность

Рис. 144. Комплексный первичный ореол меди, цинка, свинца, серебра, мышьяка, молибдена и бария в связи с узкими вертикальными рудными телами медноколчеданного месторождения Таш-Яр. По Э. Н. Баранову

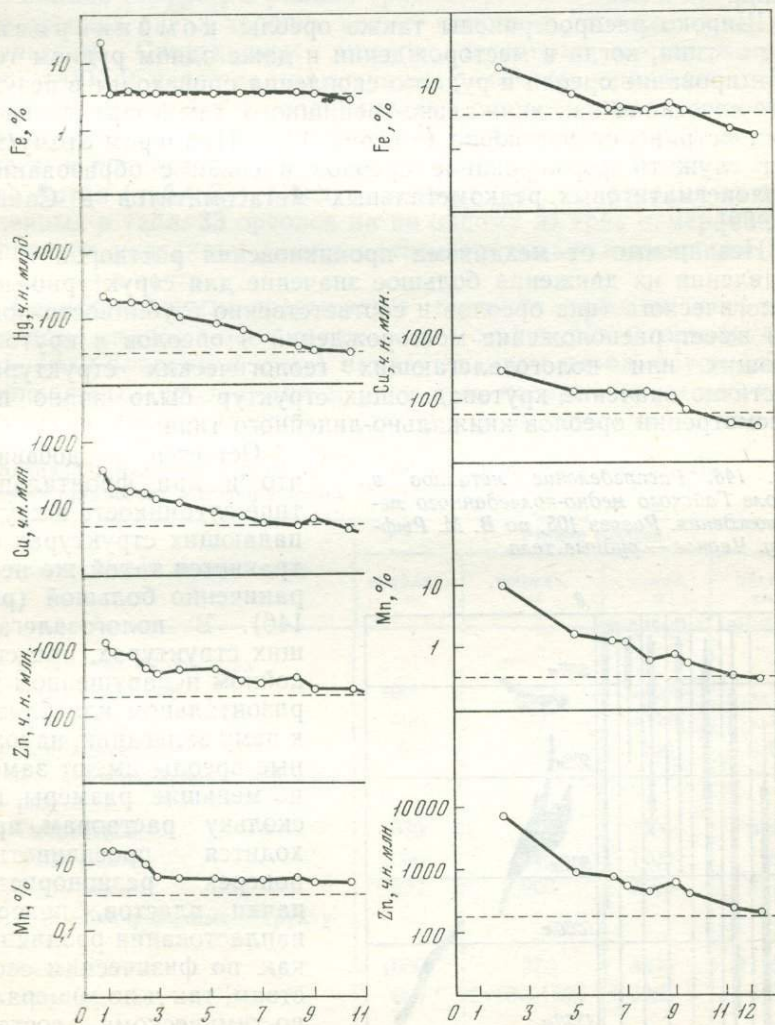
Штриховыми линиями обозначены рудные тела. Остальные условные обозначения см. рис. 26



прямо будет связана с крутизной складок, в которых участвует рудомещающая продуктивная толща.

При фронтальном продвижении — просачивании растворов захватываются во много раз большие объемы вмещающих пород, что определяет большие объемы обрабатываемого пространства с ореолами распространения элементов-индикаторов, весьма значительными по всем трем измерениям, в отличие от ореолов кинжального происхождения, имеющими большие раз-

Рис. 145. Рассеяние металлов в донных осадках Красного моря в зависимости от степени удаления от рудного скопления впадины Атлантик II (левая часть) и впадины Неревус. По Бигнеллу и др. [67]

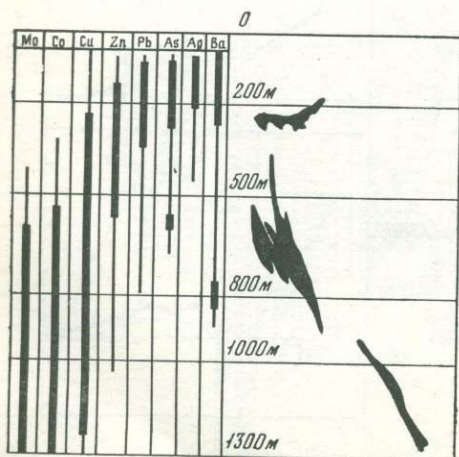


меры только в плоскости трещины или зоны. Ореолы этого типа формируются в результате фильтрации растворов по крупным блокам (зонам) повышенной проницаемости. Они имеют контрастно асимметричную зональность, хорошо улавливаемую в пределах изучаемого пространства, занимают большой объем пород и характеризуются широким морфологическим разнообразием. Они тесно связаны с зонами распространения гидротермально измененных околорудных пород. Характерные ореолы фронтального типа образуются в связи с месторождениями колчеданной [56] и меднопорфировой формаций, полиметаллическими метасоматическими месторождениями, и многими другими генетическими типами и группами эндогенных месторождений.

Широко распространены также ореолы комбинированного типа, когда в месторождении и даже одном рудном теле формирование ореола и рудного скопления происходит в результате сочетания как кинжально-трещинного, так и фронтального распространения растворов (см. рис. 143). Примером этому может служить формирование ореолов в связи с образованием околосегментитовых редкометалльных метасоматитов в Саянах [35, 59].

Независимо от механизма проникновения растворов и направления их движения большое значение для структурно-морфологического типа ореолов и соответственно глубинности поисков имеет расположение месторождений и ореолов в крутопадающих или пологозалегающих геологических структурах. Частично значение крутопадающих структур было видно при рассмотрении ореолов кинжально-линейного типа.

Рис. 146. Распределение металлов в ореоле Гайского медно-колчеданного месторождения. Разрез 105, по В. М. Рыфтину. Черное — рудные тела



Остается добавить, что и при фронтальном типе глубинность в крутопадающих структурах сохраняется такой же неограниченно большой (рис. 146). В пологозалегающих структурах, при спокойном ненарушенном горизонтальном или близко к нему залегании, надрудные ореолы имеют заметно меньшие размеры, поскольку растворам приходится просачиваться поперек разнородной пачки пластов, поперек напластования различных как по физическим свойствам, так и по минерально-химическому составу

пород. В этом морфогенетическом типе глубинность поисков в основном определяется значительным распространением ореольных ассоциаций индикаторов вверх в связи или с многочисленными и разнообразными дизъюнктивными структурно-тектоническими элементами, или же с также многочисленными и разнообразными дорудными и интеррудными (в меньшей степени пострудными) дайками. Характерным примером образования протяженных столбообразных ореолов над пологим рудным телом также в пологозалегающей покрывающей толще является Подольское медноколчеданное месторождение на Южном Урале, автономно локализованное на глубине свыше 600 м от современной дневной поверхности и открытое геофизикой при уверенном знании структуры района (рис. 147). Роль даек в вытягивании ореолов вверх хорошо видна, например, также на южноуральском Светлинском медноколчеданном месторождении (рис. 148). В качестве иллюстрации размеров первичных геохимических ореолов и их зависимости от положения в различных структурах можно привести данные А. А. Головина [27], относящиеся к колчеданно-полиметаллическим месторождениям Рудного Алтая (табл. 33). Следует подчеркнуть, что ни один из приведенных в табл. 33 ореолов ни по одному из трех измерений не околонтурен, указанные размеры относятся только к доступной для изучения их части.

Рваное, лоскутно-прерывистое строение ореолов, особенно наглядно видимое в пологозалегающих структурах с горизонтальным (или близким к нему) напластованием пород, обусловлено фронтальным продвижением растворов поперек пачки разнообразных по литологическому составу и физическим свойствам по-

Таблица 33. Размеры первичных геохимических ореолов колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая

Тип структуры и месторождение	Размер ореолов			
	глубина, м	ширина, м	длина, м	объем, км ³
I. В пологих структурах				
Золотушинское	1000	900	1900	1,7
Степное	400	1500	2000	1,2
Корбалихинское	220	120	900	0,02
II. В крутопадающих структурах				
Петровское	530	100	1000	0,05
Тишинское	1000	800	1200	1,0
Иртышское	1000	900	9000	8,1
III. В комбинированных структурах				
Белоусовское	1600	900	8000	11,5
Зыряновское	800	400—1800	5000	4,4

род. Степень концентрации элементов-индикаторов в ореолах весьма сильно зависит от степени пористости и проницаемости пород. Причем здесь возможны все количественные переходы между двумя резко различными крайними случаями: от полной (или почти полной) непроницаемости до почти свободного течения. В первом случае над рудным телом или ближайшей к нему ореольной частью, создаются непроницаемые для растворов экраны, препятствующие проникновению вверх не только рудного вещества для образования промышленных скоплений, но и рассеянных металлов для образования ореолов.

Рис. 147. Схема строения комплексного первичного ореола Подольского медноколчеданного месторождения. По Э. Н. Баранову

1 — эпигенетические ореолы; 2 — конседиментационные ореолы; 3 — сингенетические ореолы; 4 — граница структурных ярусов; 5 — контуры экранирующего субвулканического тела; 6 — рудная залежь; 7 — 8 — разрывные нарушения

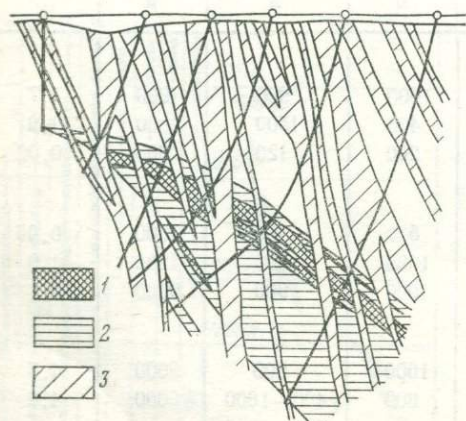
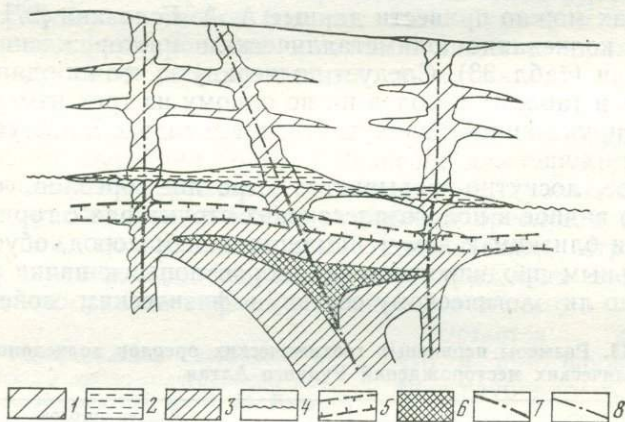


Рис. 148. Схема строения эндогенного ореола Светлинского медноколчеданного месторождения. Развитие эпигенетических ореолов в связи с дайками (по Э. Н. Баранову)

1 — рудные тела;
2 — сингенетические ореолы;
3 — эпигенетические ореолы

Зависимость концентрации ореольных металлов от пористости вмещающих пород хорошо иллюстрируется данными В. М. Рыфтина по Гайскому медноколчеданному месторождению [58], от проницаемости — данными А. А. Головина по колчеданно-полиметаллическим месторождениям Рудного Алтая (рис. 149). Облегченное проникновение растворов обуславливается не только естественной большой первичной пористостью и проницаемостью, но и наложенными обычно предшествующими рудоотложением трещиноватостью, дроблением, катаклизмом, расщеплением (рис. 150). Если обратиться к зависимости размеров и интенсивности первичных геохимических ореолов от минерального и химического состава вмещающих пород, то в первую очередь следует указать на то, что по чистым известнякам ореолы совершенно не образуются. Ореольные металлы высаживаются в них только при наличии загрязнения каким-либо силикатным материалом: туфовым, инъекционным и пр. Это, между прочим, служит еще одним свидетельством тому, что при данных условиях садка металлов из раствора может происходить только в случае обменной реакции [55].

Рис. 149. Распределение элементов-индикаторов в породах различной проницаемости. По А. А. Головину

Колчеданно-полиметаллические месторождения Рудного Алтая: I — Корбалихинское месторождение; II — Ново-Золотушинское месторождение; 1 — лавобрекчии липаритовых порфиров; 2 — туфопесчаники; 3 — аргиллиты, алевропелиты; 4 — кварциты; 5 — хлориты

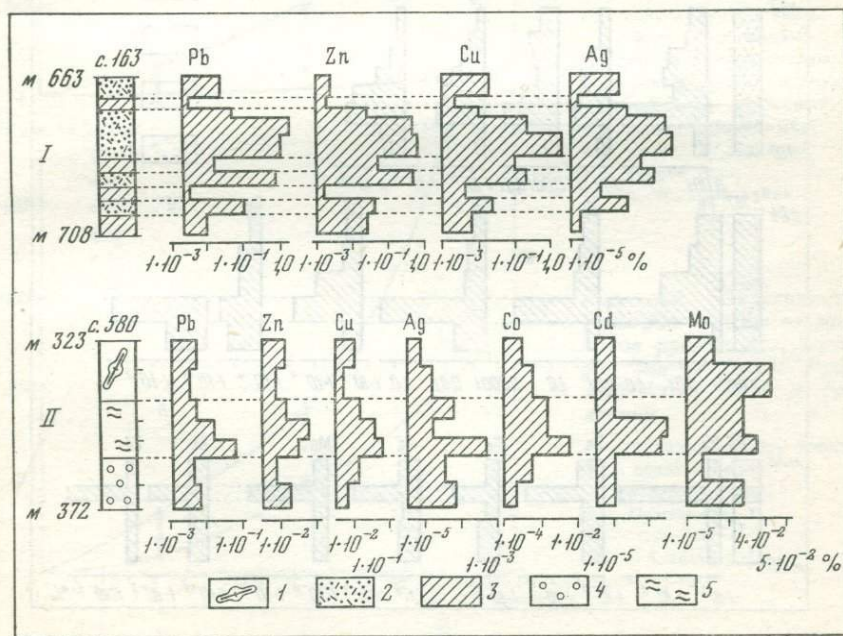
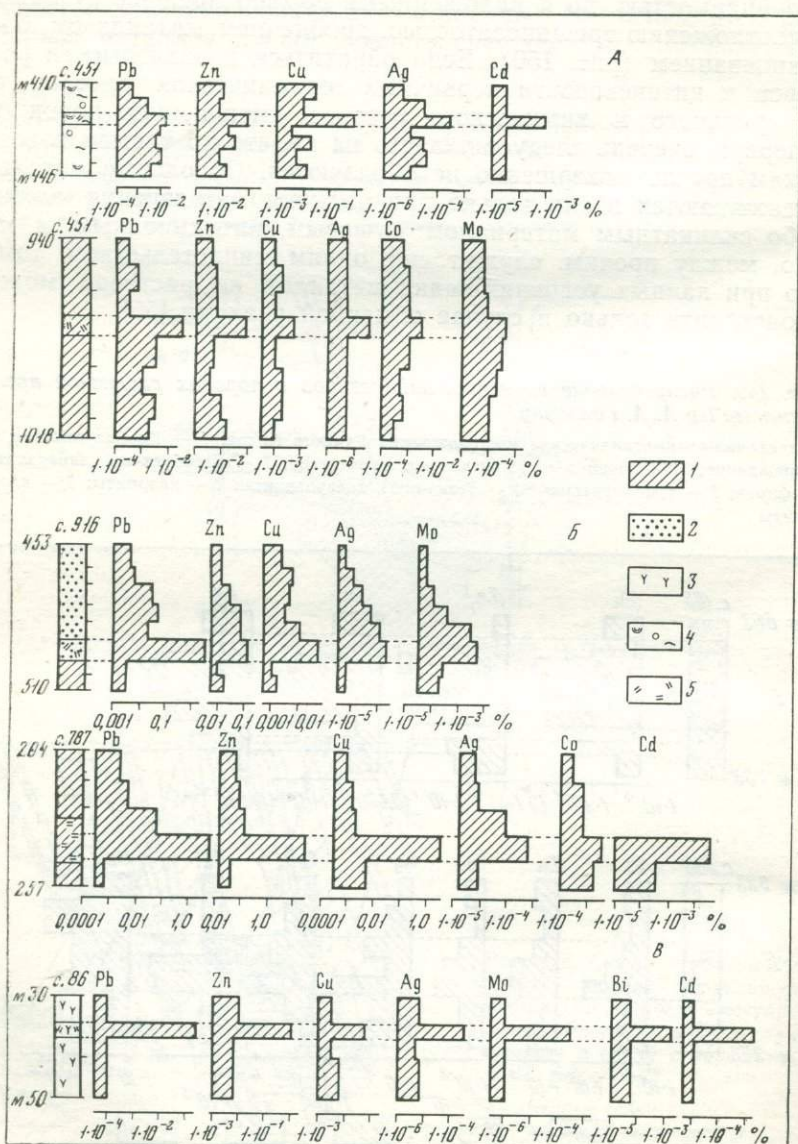
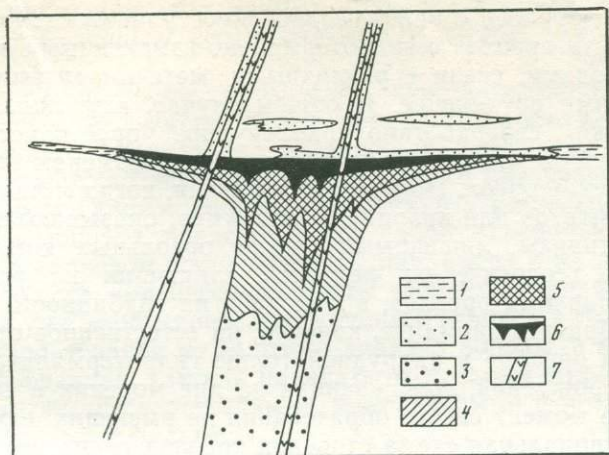


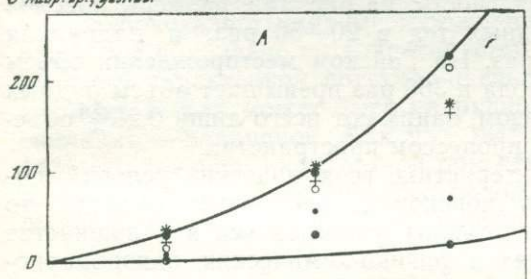
Рис. 150. Зависимость концентрации элементов-индикаторов от тектонической проработки вмещающих пород Золотухинского (А), Зареченского (Б) и Корбалихинского (В) колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая; по А. А. Головину

1 — аргиллиты и алевролиты; 2 — песчаники; 3 — туфы порфиров; 4 — серицит-кварцевые породы; 5 — зоны расщелачивания и дробления





S надр. ор., усл. ед.



S, ореола, усл. ед.

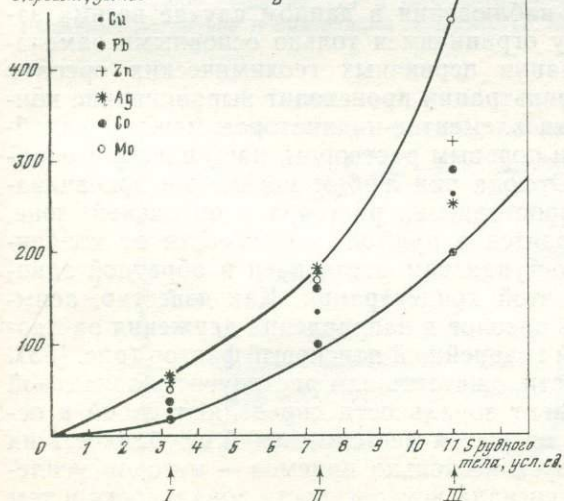


Рис. 151. Принципиальная схема строения первичного ореола гидротермально - осадочного колчеданного месторождения. По Э. Н. Баранову

- 1 — конседиментационные фланговые ореолы;
- 2 — эпигенетические ореолы;
- 3 — сингенетичный подрудный ореол, удаленный;
- 4 — то же, близрудный;
- 5 — то же, околорудный;
- 6 — рудное тело;
- 7 — пострудные дайки

Рис. 152. Зависимость размеров ореолов от размеров рудных тел, которые они окружают. Рудный Алтай. По А. А. Головину

- A — надрудная часть ореола
 B — ореол в целом; месторождения:
 I — Петровское,
 II — Степное,
 III — Золотушинское

Уже говорилось о закономерной пространственной и генетической связи ореолов с гидротермально-измененными околорудными породами, связи с различными метасоматитами, сопровождающими оруденение. В общем случае, чем сильнее метасоматически переработано околорудное пространство, тем интенсивней по содержанию и объемней по размерам первичный геохимический ореол. Но возможны случаи, когда метасоматиты, типа альбититов или кварцитов, например, оказываются, подобно известнякам, лишенными совсем ореольных компонентов. Из прочих геологических факторов, влияющих на размеры и форму первичных ореолов, а отсюда и на глубинность поисков, следует обратить внимание, конечно, на естественное отсутствие первичных ореолов в надрудной толще гидротермально-осадочных месторождений, возникающих на дне морских и иных бассейнов и в момент своего образования не имеющих пород кровли. Принципиальная схема строения ореолов таких месторождений показана на рис. 151. На глубинность поисков также влияет и такой фактор, как размеры месторождений: в общем случае, чем крупнее рудное тело, тем шире и объемней окружающий его ореол, тем больше, таким образом, возможная глубина его обнаружения. Как видно, в частности, на рис. 152, размеры ореолов превышают размеры рудных тел в 20—50 раз, а надрудная часть ореолов в 15—20 раз. На Гайском месторождении объем только богатой части ореола в 360 раз превышает объем рудных тел, которые, таким образом, занимают всего лишь 0,28% объема захваченного рудным процессом пространства.

Если перейти к характеристике геохимических условий, определяющих глубинность поисков по первичным ореолам, то здесь наши рассуждения должны основываться в большинстве на априорных положениях и физико-химических закономерностях общего характера, так как опираться непосредственно на геологический опыт и наблюдения в данном случае весьма затруднительно. Поэтому ограничимся только основными замечаниями. При формировании первичных геохимических ореолов путем диффузии или фильтрации происходит выравнивание концентрации привносимых элементов-индикаторов между рудообразующим раствором и поровым раствором, насыщенным обрабатываемые породы. Отсюда при любом механизме просачивания, движения и распространения раствора в ореольной зоне, размеры ореолов находятся в прямой зависимости от концентрации элементов в поступающем растворе и в обратной зависимости от градиента этой концентрации. Как известно, асимметричная зональность ореолов в направлении движения растворов представляет собой главнейший поисковый фактор (рис. 153). Степень ее контрастности, сжатость или растянутость зональной колонны ореола, градиент зональности определяют собой в основном эффективность открытия месторождений, глубинность их обнаружения. Существует несколько приемов — методов усиления ореолов, усиления сигнала контрастности зональности и тем

самым увеличением познаваемых размеров ореолов, повышения глубинности поисков соответственно. К таким методам относятся:

— непосредственное повышение чувствительности анализа с автоматическим уменьшением тем самым обнаруживаемого минимального аномального содержания элемента-индикатора;

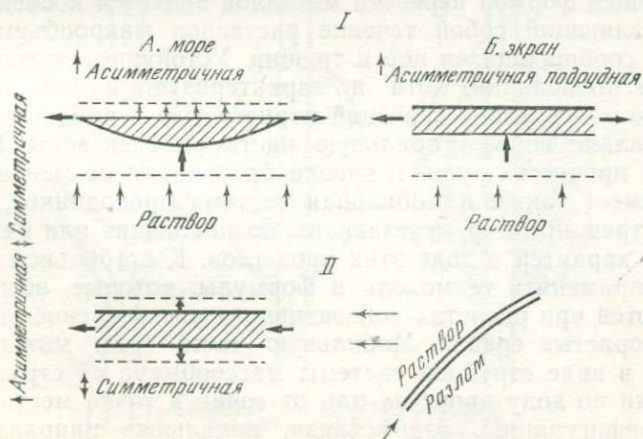
— разработка и введение рационального (фазового) анализа, при котором валовое содержание элемента распадается на содержание фоновое, представленное одной минеральной формой (свинец в калиевом полевом шпате, например) и на содержание ореольное, где привнесенная часть элемента-индикатора представлена уже иной минеральной формой (свинец в галените);

— использование не валового анализа породы, а выделенной тяжелой фракции, так как индикаторы-металлы в ореолах представлены обычно собственными минеральными формами, в первую очередь сульфидами;

— применение методов накопления сигналов путем суммирования или мультипликации параметров содержаний элементов-индикаторов.

Как показывает практика, зональность первичных геохимических ореолов эффективно может быть использована для поисков глубокозалегающих месторождений только в том случае, когда она правильно интерпретируется. Фронтальная часть ореола с его характерной поисково-оценочной ассоциацией индикаторов не всегда может быть надрудной, также как тыловая ассоциация — подрудной. Как уже было показано (см. рис. 142, 143) это связано с конкретной ориентировкой направления движения растворов, относительно положения рудного тела и вмещающей структуры, сопровождающейся отстройкой поисковой

Рис. 153. Экранированные (I) и горизонтально-фронтальный (II) варианты движения растворов и ориентации зональности первичных ореолов



контрастной асимметричной зональности. Схемы дополняют основные варианты геологической ориентации асимметричной и симметричной зональности ореолов.

Механизм образования ореолов и рудных тел

Накопление руд происходит двояким путем: 1) с использованием полого пространства, при преобладающем отложении в трещинах и 2) в результате метасоматического замещения. Эти два типа отложения проявляются как самостоятельно, так и обычно в сочетании друг с другом. Первичные ореолы в обоих случаях образуются путем метасоматического замещения, закономерно сочетаясь с рудными телами. Рудное тело и первичный геохимический ореол составляют единое целое. Размеры ореолов, так же как и рудных тел, зависят от морфогенетического типа месторождений и конкретных геологических условий, как это достаточно наглядно было видно из всего предыдущего материала.

Благоприятная для рудообразования зона земной коры, составляющая по вертикали 5—7 км [54], условно может быть подразделена на три области: 1) область мобилизации металлов, 2) область движения растворов, коммуникаций и 3) область рудоотложения. Здесь пойдет речь о явлениях в третьей области, о непосредственном рудоотложении. Вслед за Г. Л. Поспеловым [67], область рудоотложения, включающую и ореольное пространство, можно подразделить на три зоны: а) зону ввода растворов, б) рабочую зону, в) дренажную зону, зону вывода. Перемещение металлов в области рудоотложения, особенно в ее рабочей зоне, включая и валовое движение рудообразующего раствора, осуществляется в результате сочетания многих как взаимосвязанных, так и независимых процессов, что весьма детально и доказательно удалось изложить Г. Л. Поспелову [67] в его последней книге.

Ведущей формой переноса металлов является конвективный, представляющий собой течение растворов макрообъемами по системе сообщающихся пор и трещин. Устойчивые трещинные и поровые проводники, хотя и характеризуются меняющимися в широком диапазоне значений пористостью и проницаемостью, представляют собой стабильную часть рабочей зоны. В то же время в процессах рудо- и ореолообразования не меньшее значение имеет также и мобильная система проводников, состоящая из трещин и пор, исчезающих, возникающих или меняющих место и характер в ходе этих процессов. К стабильной системе можно применять те модели и формулы, которые обычно используются при расчетах конвективного массопереноса в капиллярно-пористых средах. Мобильную часть зоны можно представить в виде струйной системы массообмена со струями, меняющимися по ходу процесса или от точки к точке местоположение, конфигурацию, взаимосвязи, локальные направления и

интенсивность движения. Все это дает возможность сопоставить движение растворов и массоперенос в мобильной зоне с турбулентным течением жидкости, для которого характерны неупорядоченные движения отдельных элементарных объемов, поперечные смещения струй по общему сечению потока, сложные движения объемов и т. д.

Можно представить по крайней мере три модели сочетания стабильной и мобильной систем массопереноса [67] при ореоло- и рудообразовании (рис. 154): а) зона ввода и дренажная зона разделены рабочей зоной псевдотурбулентного переноса; соответствует случаю, когда растворы по устойчивым трещинам или поровым проводникам подводятся к рабочей зоне с одного края и отводятся с другого, в пределах рабочей зоны их нет; б) зона ввода и дренажа непосредственно переходят друг в друга; в месте перехода к сквозной стабильной зоне примыкает зона псевдотурбулентного переноса, сложно сочетающегося с переносом по сквозной зоне; это может происходить в случае, когда в зоне отложения унаследуются старые трещины и связанные системы макропор, обеспечивающие сквозной устойчивый транзит растворов; в) сквозная транзитная зона представляет собой устойчивую трещину, около которой развивается околотрещинный метасоматоз и ореолообразование путем продвижения от нее фронта замещения, оставляющего после себя метасоматит или руду со стабилизированной пористостью. Эти модели характеризуют собой элементарную ячейку ореольного пространства,

Рис. 154. Модели динамической ячейки функциональной системы рудоотложения при локальном замещении и фильтрационном транзите. По Г. Л. Поспелову

1 — стабильный транзитный канал; 2 — стабильный ламинарный конвективный перенос; 3 — турбулентный перенос в рабочей зоне; 4 — рудная залежь со стабилизированной пористостью. ЗВ — зона ввода; ДЗ — дренажная зона; РЗ — рабочая зона

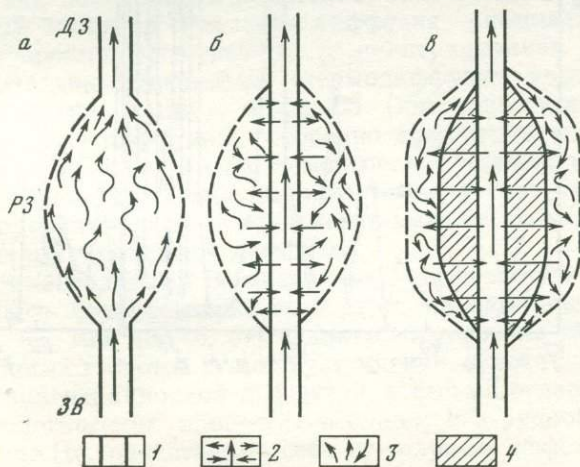
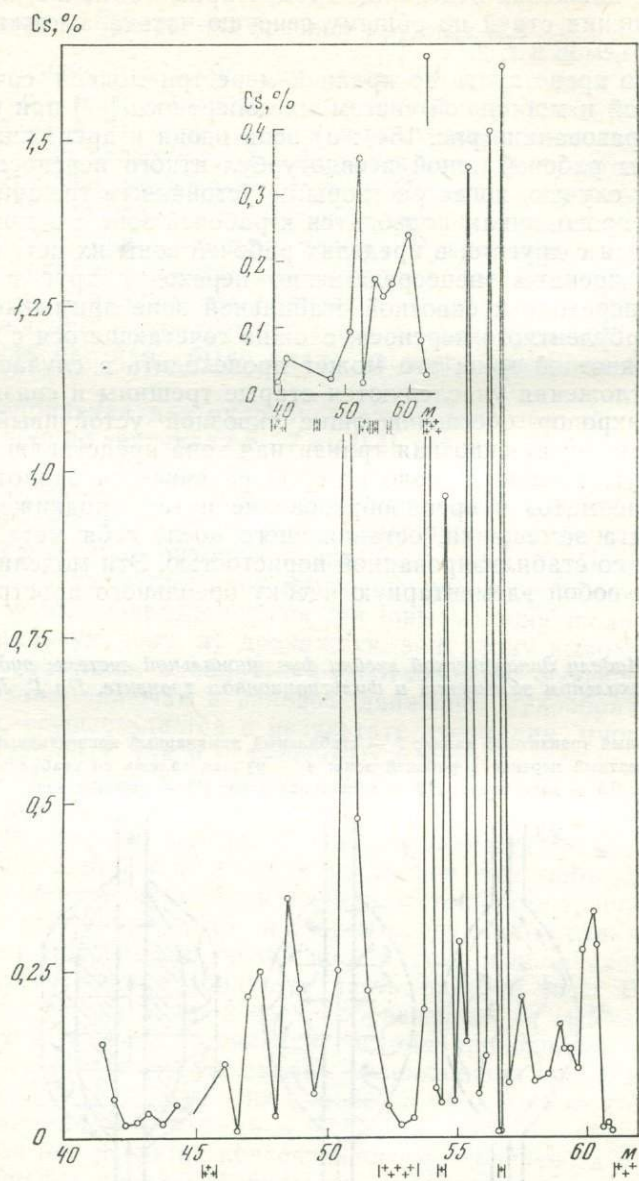


Рис. 155. Резко контрастное распределение цезия в ореольном пространстве — отражение трещинно-порового механизма формирования ореолов



модуль ореоло-рудоотложения. В конкретных условиях отдельных месторождений подобные ячейки могут неоднократно повторяться в пространстве и многообразно комбинироваться. Любые конкретные проявления процесса в малых или больших масштабах можно свести к данным или схожим моделям. Характерным примером резко контрастного сочетания движения растворов по многочисленным сквозным трещинам и порам в межтрещинном пространстве может служить одно из пегматитовых полей Сибири (рис. 155).

Движущей силой рудообразующих растворов является градиент давления. В то же время рабочая зона ореолообразования характеризуется гетерогенностью давления. Общий градиент в ее пределах осложняется возникновением вторичных напоров и перепадов. В частности, втекание растворов из трещин в поровые пространства и, наоборот, дренирование трещинами растворов из пористых сред вызывают локальные перепады давления, что непосредственно следует из общеизвестных законов гидродинамики. Следует учитывать также гетерогенность горного давления и, вероятно, широко распространенное в описываемых условиях явление конвективного переноса с гидроразрывом, как точечно-рассеянным, увеличивающим проницаемость влажной массы за счет развития дополнительных сквозных канальных систем, так и линейным, ведущим к возникновению, росту и расширению трещин.

В весьма сложной, таким образом, по своему внутреннему строению среде ореоло- и рудообразования перенос металлов и прочих компонентов растворов, наряду со сквозной, достаточно интенсивной фильтрацией, совершается также с помощью других процессов, главным образом различных диффузионных механизмов. Участие диффузии в формировании ореолов и рудных тел несомненно. Однако в данном случае диффузию нельзя сводить к простейшим представлениям и расчетам; в реальных условиях она политипна и полигенна, т. е. всегда носит комбинированный характер. Реальная диффузия — комплексный процесс, включающий естественные (концентрационная диффузия) и принудительные механизмы (термодиффузия, электродиффузия, влияние гравитации), эффузию (кнудсеновское течение), активированную диффузию, особенно эффективную в горных породах, пропитанных водой, осмотические явления. В этих условиях, особенно при более высоких температурах, одновременно могут проявляться и конкурировать механизмы межзерновой, поверхностной и объемной диффузии.

Экспериментальному исследованию диффузионного массопереноса сквозь водонасыщенные горные породы посвящен ряд работ [98, 97, 106, 48, 46, 67]. Однако этот вопрос мало изучен и среди многих геологов существует мнение, основанное лишь на законах концентрационной диффузии, о весьма ограниченной ее роли в геологических процессах в общем и в рудообразовании в частности. Но, представляя себе суммарный эффект всех тех

реальных процессов, которые неизбежно проявляются при формировании ореолов [48, 67], можно прийти к более оптимистическому выводу. Исследования [67], в частности, показали, что в трехметровых горизонтальных трубах, заполненных влажным песком, скорость диффузии минимум 50 см в год. Диффузия из донорных камер, залитых 10%-ными растворами иодистой ртути, вполне обеспечивает эффективный массоперенос на всю длину трубы. А. С. Лапухов [48] изучал диффузию 10%-ного раствора азотнокислого свинца через водонасыщенные кварцевый песчаник, кварцево-серицитовый сланец, кварцевый кератофир и гранит. Исходя из полученных данных, А. С. Лапухов обосновывает реальную возможность переноса свинца диффузионным способом в растворе 10^{-6} экв/л при 400°C за 10 000 лет в плотном кварцевом песчанике на расстояние 65 м, а в кварцево-серицитовых сланцах по сланцеватости — на 200 м. Таким образом, даже градиент концентрации, вероятно, может рассматриваться как одна из причин переноса металлов в ходе ореолообразования в пределах десятков метров.

Опыты [46] показывают, что присутствие воды в межзерновом пространстве горных пород резко активизирует и ускоряет диффузию растворенных веществ. Так, измеренные эффективные коэффициенты диффузии для ^{59}Fe в гранодиоритах оказались равными $4 \cdot 10^{-5}$ см²/с, а для ^{45}Ca при 910° — $2 \cdot 10^{-3}$ см²/с. Довольно многочисленные опыты, моделирующие фильтрацию растворов через пористые горные породы, позволили, выявить и изучить так называемый фильтрационный эффект — явление дифференциального перемещения компонентов сложного рудообразующего раствора, при котором не только растворенное вещество и растворитель имеют различную скорость перемещения, но и разные ионы [53, 40, 100]. Фильтрационный эффект как суммарный результат ряда явлений, частично указанных выше, имеет существенное значение в формировании ореолов и рудных тел и в проявлении в них контрастной зональности.

Во всех месторождениях длительное минералообразование как в рудных телах, так и в ореолах протекает в условиях закономерного изменения свойств растворов, происходящего одновременно с понижением температуры. Изменения в растворах и осаждение могут быть следствием самых различных процессов с взаимодействием частиц внутри раствора, растворов между собой, раствора с вмещающей породой или с ранее образованными минералами и т. п., вызванным большим числом физико-химических, химических, физических факторов. Поскольку эти факторы вызывают одно и то же явление, очень редко удается определить какую-то одну исключительную причину осаждения. Это не говоря уже о снижающейся температуре, которая в большинстве случаев является неизбежной первопричиной последовательного минералотложения в месторождениях. Для большинства сульфидных минералов, например, это общепризнано [104].

Все изложенное подчеркивает, что ореоло- и рудообразование представляет собой результат весьма сложного сочетания многих параллельных и последовательных процессов. К нему нельзя применить готовые схемы физической химии, описывающие одну какую-либо сторону. Геологические наблюдения и факты вскрывают закономерности состава и строения ореолов и рудных тел; раскрытию механизмов их формирования может способствовать экспериментальное моделирование с изучением результирующих параметров в пределах геологических ограничений. Сравнительное изучение эндогенных рудных месторождений, различных по промышленному металлу, происхождению и геологическим условиям образования, обнаруживает удивительную стандартность рудообразующего раствора, постоянство его анионного состава и свойств, что свидетельствует о весьма узком диапазоне изменений физико-химических параметров рудообразования во времени и пространстве, оказывающихся к тому же мало зависимыми от геологической среды [54, 6, 104]. Такое заключение в первую очередь основывается на минеральном составе рудных тел и зон околорудных изменений, а также на составе газовой-жидких включений. Ярким фактом является также поразительная однотипность геохимических ореолов, окружающих рудные тела.

Как известно, наиболее важной особенностью первичных геохимических ореолов является их зональность, которая выражается в закономерном изменении в пространстве качественных и количественных параметров. Зональность ореолов может проявляться в любом сечении объемной фигуры, но больше всего она контрастна в направлении движения рудообразующих растворов и обусловлена дифференциальным распределением элементов вдоль оси этого движения. В большинстве случаев можно говорить о вертикальной зональности с преимущественным накоплением одних ассоциаций элементов в головных частях ореолов, а других — в тыловых. Для различных по составу и происхождению гидротермальных месторождений на сульфидной основе, как уже было показано, устанавливается качественно близкая зональность, которая в обобщенном виде может быть представлена единым реальным рядом наиболее распространенных элементов-индикаторов (в направлении движения растворов — от надрудных сечений к подрудным): Hg — Ba — Sb — As — Ag — Cd — Pb — Zn — Cu — Bi — Ni — Co — Mo — Sn — Be — W.

Нетрудно видеть, что эта зональность ореолов повторяет давно известную внутреннюю зональность рудных тел, а также помеченную Эммонсом зональность регионального размещения месторождений. Зональности рудных тел и ореолов однотипны и обусловлены одними и теми же причинами. Зональное строение и размещение месторождений — важнейшая как в практическом, так и в теоретическом плане закономерность, которая издавна привлекала внимание геологов [75]. Как известно, по этому вопросу существует обширная литература с попытками дать теоретическое обоснование зональности.

Не вызывает сомнений, что вертикальная зональность рудных тел и ореолов — зональность отложения, связанная с изменением внутреннего равновесия рудообразующего раствора. Исходя из изложенных выше предпосылок, можно предполагать, что наиболее вероятным механизмом отложения является осадочно-хроматографический, осложненный, однако, на своем исходном этапе особенностями внутреннего строения и состава растворов. Наиболее простой фактор — растворимость сульфидов в воде, к сожалению, совершенно не определяет их зонального отложения и даже зачастую в этом случае наблюдается последовательность, обратная природной. Это обусловлено тем, что перенос металлов в рудообразующих растворах, как это сейчас стало уже общепризнанным [61, 6], осуществляется в виде комплексных соединений, характеризующихся высокой растворимостью и устойчивостью, а также прочими свойствами, резко отличающими их от коллоидных и простых ионных соединений, на которых обычно строятся различные термодинамические расчеты и делаются далеко идущие выводы. Г. Л. Барнс и Г. К. Чаманский [6] весьма категорично подчеркивают, что единственной возможностью эффективной концентрации большинства металлов в гидротермальных месторождениях является перенос их в виде комплексных ионов и молекул.

Зональная последовательность рудоотложения остается одинаковой в широком интервале температур, давлений и геологических условий в связи именно с тем, что осаждающиеся металлы находятся в растворе в виде комплексов с очень близкими термодинамическими свойствами и стехиометрией. Если стехиометрия была бы различна, то такие металлосодержащие комплексы по-разному реагировали бы на изменение давления, температуры, концентрации, рН и другие факторы; порядок их осаждения должен был бы несомненно изменяться в зависимости от условий осаждения и вызывающих его причин [6]. Все сказанное относится и к первичным ореолам. Таким образом, можно с большой долей вероятности утверждать, что зональность рудных тел и ореолов определяется разной устойчивостью комплексов, в виде которых переносятся металлы в растворах. Относительную устойчивость комплексов с ковалентной связью можно рассчитать, используя рассуждения и методику К. Б. Яцимирского [94]. К оценке изменения энтропии при реакциях комплексообразования в водном растворе можно подойти следующим образом. При реакции $M_{\text{вод}}^{z+} + n \cdot A_{\text{вод}} = [MA_n]_{\text{вод}}$ (M^{z+} — центральный ион, А — лиганд) изменение энтропии равно

$$\Delta S = S_k - S_m - n \cdot S_a,$$

где S_k , S_m , S_a — энтропии в водном растворе соответственно комплексного иона, центрального иона и лиганда. Поскольку с увеличением радиусов возрастают энтропии всех ионов, радиусы же простых и комплексных ионов с одними и теми же лигандами изменяются симбатно, можно думать, что для данного ряда од-

нотипных комплексных ионов разность $S_h - S_m$ остается примерно постоянной. Величина S_a также постоянна в ряду однотипных ионов, поэтому и изменение энтропии при образовании однотипных комплексных ионов должно быть примерно постоянным. Следовательно, между изменением свободной энергии и тепловым эффектом реакции комплексообразования в рядах однотипных ионов существует простая связь $\Delta H = \Delta Z + \text{const}$, где $\text{const} = T\Delta S$.

Учитывая предполагаемую симбатность в изменении ΔH и ΔZ для однотипных процессов комплексообразования, к оценке факторов, определяющих устойчивость комплексных ионов, можно подходить, используя термодимические данные. При образовании комплексного иона с ковалентной связью происходит заполнение электронных уровней иона комплексообразователя и в энергетическом отношении центральный атом приближается к состоянию свободного газообразного атома металла. В связи с этим [94] изменение энергии при процессе $M_{\text{вод}}^{Z+n} \rightarrow M_{\text{газ}}$ может до известной степени характеризовать тенденцию данного иона к образованию прочных ковалентных связей, в том числе и к образованию комплексных ионов с донорноакцепторной связью.

Изменение энергии при рассматриваемом процессе представляет собой разность между потенциалом ионизации данного атома и теплотой гидратации образующегося иона, которая и может служить показателем устойчивости комплексов. В табл. 34 даны значения этого показателя. Как указывает К. Е. Яцимирский, сопоставление этих данных с данными по изменению свободной энергии (вычисленной из констант устойчивости) тиосульфатных, галогенидных и роданидных комплексов двухзарядных ионов показывает, что обе величины изменяются симбатно и ряд устойчивости подобных комплексов совпадает с рядом по указанной выше разности. Таким образом, выведенные К. Б. Яцимирским ряды могут быть использованы для предска-

Таблица 34. Показатели устойчивости комплексов

Ион	Показатель устойчивости	Ион	Показатель устойчивости	Ион	Показатель устойчивости
Au ⁺	68	Cd ²⁺	159	Sr ²⁺	43
Ag ⁺	57	Pb ²⁺	156	Ba ²⁺	35
Cu ⁺	(36)	Cu ²⁺	137	Ca ²⁺	34
Rb ⁺	23	Zn ²⁺	136	Bi ³⁺	290
Cs ⁺	22	Ni ²⁺	97	Co ³⁺	231
K ⁺	20	Co ²⁺	93	Fe ³⁺	197
Na ⁺	18	Fe ²⁺	86	Cr ³⁺	151
Li ⁺	-2	Mn ²⁺	82	Al ³⁺	121
Hg ²⁺	228	Mg ²⁺	57	La ³⁺	37

зания существования комплексов в тех случаях, когда они не были обнаружены, и для оценки их устойчивости в тех случаях, когда они известны. Нетрудно заметить, что зональная последовательность отложения металлов в ореолах и рудных телах во многом совпадает с рядами устойчивости их комплексов, оцененной показателем таблицы.

На последнее обстоятельство обратил внимание Г. Л. Барнс [6, 95], рассчитавший по методике К. Б. Яцимирского так называемый фактор стабильности комплексов — $D_{\text{ккал}}$. Полученные Г. Л. Барнсом цифры подтверждают ряд устойчивости комплексов в пределах одного лиганда, полученный К. Б. Яцимирским:

$D_{\text{ккал}}$	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Sn	Ni	Fe	Co	Mn
		227	156	154	134	132	126	83	82	81
Показатель К. В. Яцимирского	228	159	156	137	136	—	97	86	93	82

Решающая роль комплексообразования в зональном распределении металлов в ореолах может быть проиллюстрирована нашими [60] простыми опытами. Произведено экспериментальное изучение взаимодействия в динамических условиях хлоридных и нитратных растворов ряда тяжелых металлов с полиминеральными колонками. Однородная смесь в колонке наполовину состояла (в вес. %): из кварца — 5, микроклина — 20, плагиоклаза — 15 и биотита — 10, т. е. компоненты находились в соотношении, приближенно соответствующем среднему составу изверженных пород по Барту. Остальные 50% смеси представлены пиритом и пирротином, взятыми в качестве буфера для поддержания активности серы в ходе опытов на постоянном уровне. Использовали 4 М растворы либо нитрата, либо хлорида натрия с содержанием металлов 0,1 М и ниже. Опыты проводили при комнатной температуре в стеклянных ионообменных колонках с отношением ширины к длине 1:10. Скорость протекания раствора составляла 10 мл/ч.

Во всех опытах отчетливо наблюдалось разделение металлов, обусловленное осаждением их в виде сульфидов в условиях, когда активность серы поддерживалась на постоянном уровне за счет пирит-пирротинового буфера. В случае некомплексного нитратного раствора осадочно-хроматографический эффект контролировался различиями в произведениях растворимости соответствующих сульфидов, в результате чего наметился определенный ряд уменьшения сродства металлов к твердой фазе колонки, ряд последовательности отложения, отвечающий возрастанию растворимости соответствующих сульфидов и, как видно из рис. 156, совершенно не совпадающий с рядом реальной зональности ореолов и рудных тел. При использовании хлоридных растворов характер разделения металлов в колонке за счет ком-

плексообразования становится противоположным. Суммарный эффект хлоридных комплексов, связанный с различным сродством к сере и с различной устойчивостью, приводит к такой же зональной последовательности отложения двухвалентных металлов, которая наблюдается в ореолах и рудных телах (см. рис. 156). И только висмут занимает иное положение, образующий в природных растворах, вероятно, иные более сложные комплексы, чем это было в эксперименте.

Рассмотренный выше фактор стабильности комплексов не зависит от типа лиганда, т. е. в общем случае оказывается не столь существенным, в виде каких именно комплексных соединений будут переноситься металлы. Это весьма важно при многообразии возможных типов комплексов и обилии существующих представлений о том, в виде каких соединений переносятся те или иные металлы в растворах. Большинство исследователей предполагает, что металлы рудообразующими растворами переносятся предпочтительно в виде хлоридных или же сульфидных комплексов. В последнее время Б. Дж. Скиннер и П. Б. Бартон [104], примиряя эти крайние представления, сделали попытку представить, в каких условиях будет иметь доминирующее значение тот или другой лиганд. Как следует из диаграммы рис. 157, комплекс $ZnCl_2$ будет иметь достаточную концентрацию ($\geq 0,7\%_{00} Zn$) лишь тогда, когда активность HS^- будет ниже 10^{-10} . Защитники хлоридных комплексов находят, что проблемой скорее является недостаток сульфидов, чем недостаток металлов в растворе. Единственным путем решения этой проблемы является внесение сульфата в восстановление его до сульфида для осаждения ZnS . Подтверждением этого весьма важного вывода Б. Дж. Скиннера и П. Б. Бартона могут, в частности, служить такие соображения.

Если рассматривать условия образования широко распространенных месторождений колчеданной формации, то обязательное присутствие больших масс ангидрита в подрудных частях многих месторождений исключает возможность переноса металлов в виде сульфидов. В отличие от большинства минералов, растворимость ангидрита с понижением температуры значительно увеличивается. Его наличие в нижних горизонтах ореольного пространства свидетельствует, что окисленная сера может присутствовать в гидротермальных растворах при высоких температурах без какой-либо связи с зоной близповерхностного окисления [55]. Как показал Г. Д. Холланд [90], если растворы обладают составом, равновесным по отношению к пирротину, пириту и магнетиту, то исчезновение SO_2 из них главным образом может быть связано с реакцией $4SO_2 + 4H_2O \rightleftharpoons H_2S + 3H_2SO_4$. При этом значительная часть сульфата удалится из раствора в результате прямого осаждения ангидрита: $CaCl_2 + H_2SO_4 \rightleftharpoons CaSO_4 + 2HCl$, а образующийся при этом H_2S приведет к возникновению сульфидных комплексов металлов за счет разрушения хлоридов: $PbCl_2 + H_2S \rightleftharpoons PbS + 2HCl$. При соответ-

ствующем снижении температуры наступит осаждение сульфидов в последовательности, отвечающей степени устойчивости сульфидных комплексов.

Потеря SO_2 растворами и осаждение ангидрита должно в основном завершиться при 400°C (Холланд, 89, 90). Поэтому в собственно колчеданных телах ангидрит почти не наблюдается. В более высокотемпературных меднопорфировых месторождениях

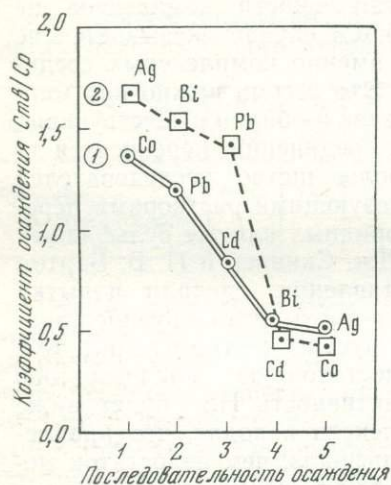
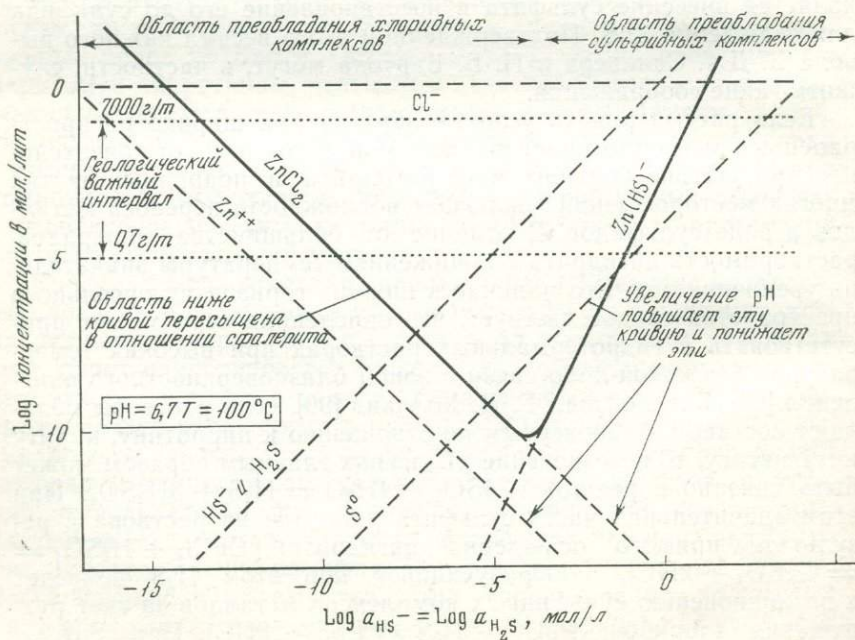


Рис. 156. Последовательность осаждения металлов из хлоридного (1) и нитратного (2) растворов, по [60]

Рис. 157. Поля преобладания хлоридных и бисульфидных комплексов цинка

Условия: активность хлорида 10^0 , температура 100° , $\text{pH} = 6,7$, обусловленная буфером $\text{HS}^- - \text{H}_2\text{S}$ [72]



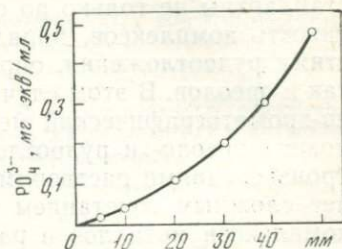
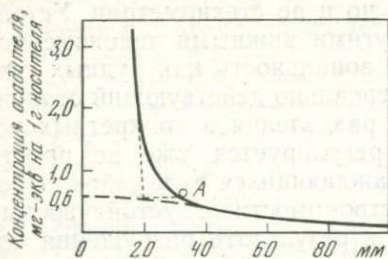
ях ангидрит — более обычный минерал. Но и здесь он, также свидетельствуя о наличии в растворах окисленной серы, тяготеет к внутренней, более высокотемпературной зоне [102]. Таким образом, главенствующей, если не единственной, формой нахождения металлов в рудообразующем растворе являются комплексные соединения. Эти комплексы должны быть универсальны и стандартны не только по составу, но и по стехиометрии. Устойчивость комплексов, наряду с другими важными закономерностями рудоотложения, определяет зональность как рудных тел, так и ореолов. В этом случае универсально действующий осадочно-хроматографический механизм разделения в конкретных условиях ореоло- и рудоотложения регулируется уже не просто произведениями растворимости осаждающихся сульфидов, а более сложным сочетанием их растворимости с устойчивостью комплексов металлов в растворе, в результате разрушения которых возможно образование этих минералов. Существенное значение для усиления контрастности зональности ореолов имеют также и физико-химические факторы, суммарное действие которых может быть выражено через фильтрационный эффект [53].

Как следует из теоретических основ хроматографического анализа [62], увеличение концентрации осадителя (в наших условиях это H_2S или иные формы нахождения серы), не оказывая влияния на порядок распределения зон, приводит к увеличению плотности осадка, уменьшению длины зоны осаждения и к улучшению разделения. Но это в определенных пределах: наиболее четкому разделению отвечает какая-то оптимальная концентрация осадителя (рис. 158), с дальнейшим ее увеличением длина зоны и плотность осадка меняются незначительно. При чрезмерной концентрации осадителя наблюдается ухудшение разделения и неравномерное распределение осадка по длине зоны. Уменьшение концентрации осадителя ниже определенного предела приводит к расплыванию зон и формированию нечеткой хроматограммы, т. е. к отсутствию нужного разделения. И тот, и другой случай наблюдается и в природных условиях. Первый относится к формированию рудных тел, сложенных сплошными массивными рудами с действительно весьма нечеткой зональностью и неравномерным распределением рудообразующих сульфидов (пирита, халькопирита, галенита, сфалерита). Второй случай характеризует зоны так называемой рассеянной минерализации, в которых зональность распределения металлов отсутствует.

Изменение концентрации осаждающихся металлов приводит к прямо пропорциональному изменению протяженности зон осаждения (рис. 159), плотности осадка, резкости границ между зонами. Непропорциональное изменение концентрации образующих ореол или рудное тело металлов может привести к потере зоны осадка, занимающего промежуточное положение и имеющего наименьшую концентрацию, и даже к изменению порядка зональности. Увеличение температуры, а также скорости филь-

Рис. 158. Зависимость длины зоны осадка $\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2$ от концентрации осадителя Na_2HPO_4 . Точка А — оптимальная концентрация осадителя. По К. М. Ольшановой и др.

Рис. 159. Зависимость длины зоны осадка — FePO_4 от концентрации PO_4^{3-} в растворе, по [62]



трации растворов приводит к возрастанию длины зон и к уменьшению резкости между ними.

Осадочно-хроматографический механизм формирования ореолов и рудных тел сопровождается таким характерным явлением, как ритмическое отложение осаждающихся минералов. Ритмические структуры в рудных месторождениях известны давно, изучались рядом исследователей с эффектным экспериментальным воспроизведением. В последнее время ритмическое отложение установлено Э. Н. Барановым и при образовании геохимических ореолов некоторых колчеданных месторождений Урала и Алтая. Таковы основные, самые общие соображения о механизме формирования первичных геохимических ореолов и рудных тел. Следующим этапом исследований в этом направлении должен стать пространственно-статистический анализ параметров ореолов различных элементов, образованных в связи с месторождениями разных морфогенетических типов, что, безусловно, позволит получить более строгое теоретическое обоснование описанного механизма, а также одновременно и новую информацию, способствующую более глубокому раскрытию условий рудообразования в целом.

РАСШИФРОВКА УСЛОВИЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОРУДЕНЕНИЯ ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Первичные ореолы представляют собой составную часть самих месторождений и именно поэтому любые данные об особенностях состава и строения первичных геохимических ореолов так или иначе будут отражать также особенности проявления процессов рудообразования в целом и локализации рудных тел в частности. Примечательно, что часто многие важные вопросы генезиса рудных месторождений получают более однозначное решение, когда наряду с рудными телами исследуются также

сопровождающие их первичные ореолы. Возможность использования результатов изучения первичных геохимических ореолов для расшифровки условий формирования месторождений спорного генезиса рассматривается на примере стратиформных свинцово-цинковых месторождений и медноколчеданного оруденения вулканогенно-осадочного генезиса. Многие вопросы генезиса стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных породах, несмотря на многолетнюю историю их изучения, все еще остаются далеко нерешенными. Отсутствие единых взглядов на генезис подобных месторождений затрудняет разработку эффективных методов их поисков, в связи с чем исследование по уточнению некоторых вопросов генезиса этих месторождений весьма актуальны, тем более если учесть возросшее за последние годы значение месторождений этого типа как важнейшего источника полиметаллов, а также ряда других металлов. Особенности состава и строения, а также генетическое значение первичных геохимических ореолов свинцово-цинковых стратиформных месторождений рассматриваются по результатам изучения месторождений Сумсар и Карасай.

Сумсарское рудное поле расположено на южном склоне Чаткальского хребта в Киргизской ССР. Одноименное свинцово-цинковое месторождение локализовано в пределах верхнего горизонта живецких доломитов, повсеместно обогащенных свинцом и цинком. Рудовмещающие карбонатные пласты смяты в складки и местами разбиты разрывными нарушениями. Рудные тела месторождения имеют пластообразную форму с нечеткими границами, устанавливаемыми по данным опробования. Руды прожилковые, вкрапленные и массивные. Основными рудными минералами месторождения являются галенит и сфалерит. В меньших количествах встречаются пирит, марказит, блеклая руда и халькопирит.

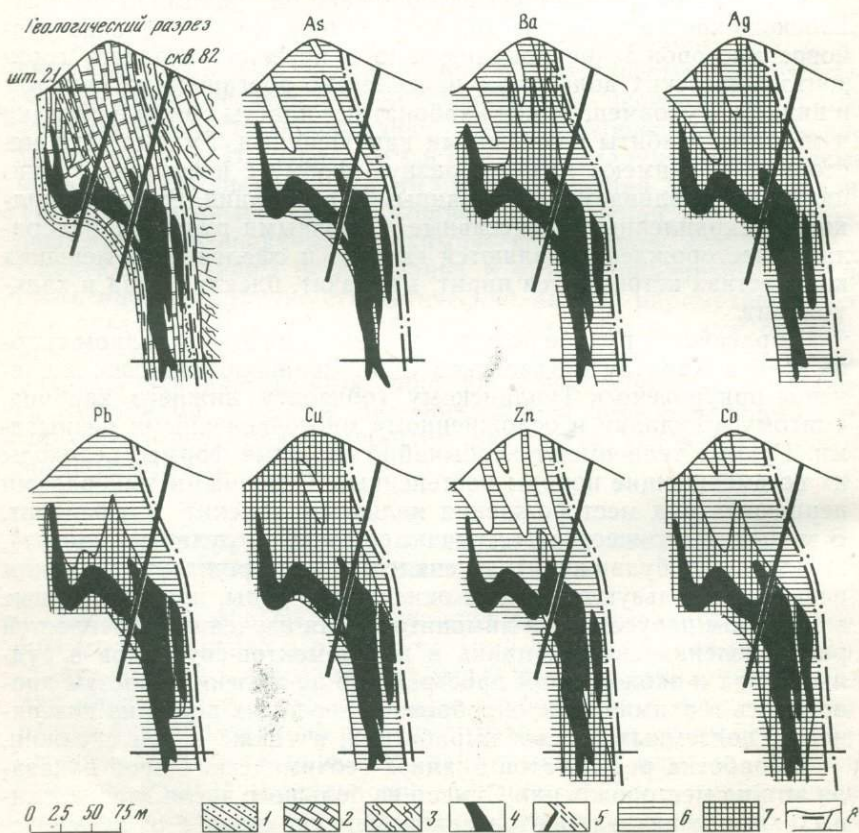
Карасайское рудное поле расположено на юго-западном склоне хребта Каратау в Казахской ССР. Свинцово-цинковое оруденение приурочено к Турланскому горизонту нижнего карбона, смятому в складки и осложненному многочисленными разрывами. Рудные тела имеют необычайно сложные формы, переходы их во вмещающие породы постепенные. Основными минералами первичных руд месторождения являются галенит и сфалерит. В меньших количествах встречаются блеклая руда (теннантит), халькопирит, буланжерит, аргентит. На месторождении широким развитием пользуются также окисленные руды, представленные в основном церусситом и лимонитом. Для изучения особенностей распределения свинца, цинка и их элементов-спутников в рудных телах и околорудном пространстве по многим разрезам проводилось геохимическое опробование коренных пород на поверхности, подземных горных выработках, а также керн скважин.

Обработка результатов анализа геохимических проб показала, что на месторождении Сумсар из большого числа исследованных химических элементов закономерную связь с рудными те-

лами проявляет распределение только свинца, цинка, серебра, меди, бария, мышьяка, кобальта и никеля. Эти элементы рассматриваются в качестве индикаторов данного типа оруденения. На рис. 160 изображено распределение ряда химических элементов по одному из типоморфных разрезов через слепое рудное тело № 8 месторождения Сумсар. В этом разрезе распределение элементов изучено в результате геохимического опробования рудовмещающих пород на поверхности, на уровне штольни (надрудная часть), керн скв. 82 (уровень рудных тел) и кваршлага на горизонте 1190 м (уровень нижних частей рудных тел). Анализ распределения элементов по этому, а также по остальным исследованным разрезам, показывает, что максимальные кон-

Рис. 160. Первичные ореолы элементов-индикаторов в разрезе (месторождение Сумсар)

1 — песчаники; 2 — рудоносные карбонатные породы; 3 — известняки; 4 — рудное тело; 5 — дизъюнктивные нарушения; 6, 7 — первичные ореолы (7 — поля повышенных содержаний элементов); 8 — буровые скважины и горные выработки



центрации элементов-индикаторов, как правило, характерны для рудных тел. В околорудном пространстве в пределах рудовмещающего продуктивного горизонта известняков и доломитов в распределении элементов-индикаторов выявляется отчетливая вертикальная зональность: одни элементы образуют наиболее широкие и контрастные ореолы в надрудных частях околорудного пространства и на уровне верхних частей рудных тел (мышьяк, медь, барий, серебро), другие — на уровне нижних частей разреза (цинк, кобальт). Расчет величин показателя зональности позволил составить следующий ряд элементов-индикаторов вертикальной зональности: мышьяк — барий — медь — серебро — свинец — цинк — никель — кобальт (сверху вниз).

Установленная на месторождении Сумсар геохимическая зональность является аналогом зональности первичных геохимических ореолов описанных выше гидротермальных месторождений. Для сравнения приводится описание зональности ореолов свинцово-цинкового месторождения Восточный Канимансур, гидротермальный генезис которого ни у кого не вызывает сомнений. Первичные ореолы месторождения Восточный Канимансур рассмотрены выше. Отметим только, что по всем изученным на месторождении Восточный Канимансур разрезам в строении первичных ореолов установлена отчетливая вертикальная зональность, обусловленная избирательным накоплением элементов-индикаторов на разных гипсометрических уровнях. Наиболее отчетливо сдвинуты вверх по восстанию рудных тел ореолы бария, мышьяка и серебра, вниз — цинка, кобальта, меди (см. рис. 64). Ореол свинца занимает промежуточное положение. Таким образом, по отношению к свинцу можно выделить индикаторы верхних (надрудных) ореолов (мышьяк, барий, серебро) и нижних (корни рудных тел и надрудные ореолы) частей ореолов (цинк, кобальт, медь).

Сопоставление вертикальной зональности первичных ореолов месторождений Сумсар и Восточный Канимансур выявляет идентичную картину в распределении элементов за исключением меди, которая на месторождении Канимансур более характерна для нижних уровней ореолов (см. рис. 64). Причина здесь в проявлении минеральной зональности: медь в форме блеклых руд преимущественно накапливается в верхних частях ореолов, тогда как халькопирит более характерен для нижних срезов ореолов (Восточный Канимансур). Как было установлено в результате обобщения данных изучения первичных геохимических ореолов большого числа гидротермальных месторождений, рассмотренная выше зональность первичных ореолов фиксирует направление движения рудообразующих растворов. Вертикальная зональность первичных ореолов крутопадающих рудных тел будет указывать на восходящий характер растворов. Таким образом, одинаковый набор элементов-индикаторов месторождения Сумсар и гидротермальных свинцово-цинковых месторождений и единая вертикальная зональность первичных ореолов указывает на один

и тот же механизм формирования этих месторождений с образованием рудных тел месторождения Сумсар также в результате деятельности восходящих гидротермальных растворов.

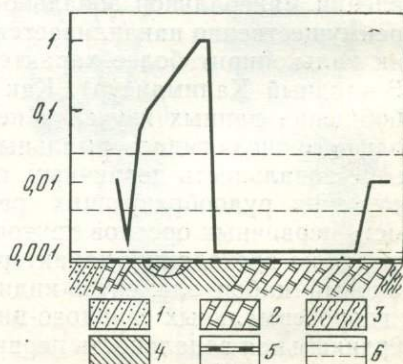
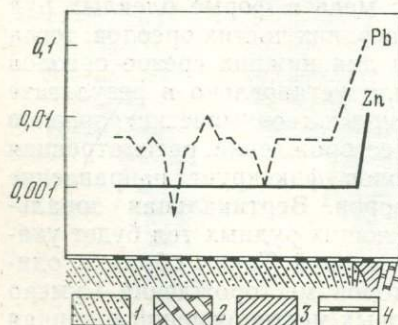
Наряду с отмеченным выше, ореолы месторождения Сумсар от типичных плутоногенных гидротермальных месторождений отличаются рядом специфических особенностей. Это прежде всего отчетливый стратиграфический контроль не только свинцово-цинкового оруденения, но и окаймляющих его первичных геохимических ореолов, которые практически не выходят за пределы продуктивной пачки карбонатных пород. Рис. 161, где приведены графики распределения основных элементов-индикаторов свинцово-цинкового оруденения, показывает резкую смену аномальных содержаний элементов фоновыми при переходе от продуктивной рудовмещающей пачки к песчаникам лежащего бока этой пачки; ореолы практически полностью исчезают в 5—6 м от мощного и богатого рудного тела, и их ширина по существу определяется мощностью продуктивной пачки. Другой интересной особенностью распределения элементов-индикаторов в продуктивных карбонатных породах Сумсарского рудного поля является наличие в пределах рудовмещающей пачки участков с содержанием элементов-индикаторов, существенно меньше фоновых. Причем характерно, что такие обедненные рассеянными металлами участки устанавливаются не повсеместно, а только в ассоциации с рудными телами. В описанном выше разрезе такое своеобразное перераспределение наиболее отчетливо наблюдается для цинка. На рис. 162 приведены графики распределения цинка, построенные по результатам опробования керна скв. 82, вскрывающей наиболее мощную часть рудного тела. Как видно,

Рис. 161. Графики распределения свинца и цинка (месторождение Сумсар)

1 — песчаники; 2 — рудоносные карбонатные породы; 3 — рудное тело; 4 — интервалы опробования

Рис. 162. График распределения цинка по скв. 82 (месторождение Сумсар)

1 — песчаники; 2 — рудоносные карбонатные породы; 3 — сланцы; 4 — рудное тело; 5 — интервалы опробования; 6 — границы фонового распределения цинка



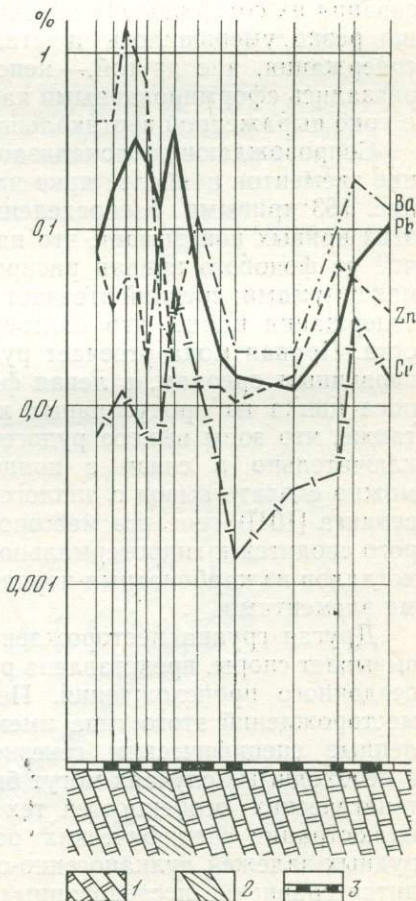
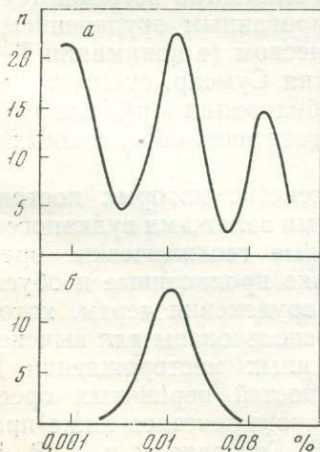
в непосредственной близости от последнего устанавливается мощная зона выноса цинка, где его содержание существенно меньше минимального фонового содержания. Это хорошо подтверждается также гистограммой распределения цинка в продуктивной пачке на фоновом участке за пределами месторождения и в ореолах, изученных по разрезу, описанному выше (рис. 163). На фоновом участке не установлены содержания менее 0,005%, тогда как в ореолах наряду с очень высокими содержаниями (более 1%) почти в 30% всех проб обнаруживаются содержания существенно меньше 0,005%. На рис. 164 в зоне, прилегающей к рудному телу, наблюдается резкое падение содержаний рудных элементов в продуктивной пачке и дальнейшее повышение в удалении от рудного тела.

Участки продуктивной рудовмещающей пачки, обедненные рудными компонентами, устанавливаются также и на месторож-

Рис. 163. Кривые распределения частот встречаемости содержаний цинка в первичных ореолах (а) и на фоновом участке (б)

Рис. 164. Графики распределения элементов-индикаторов в пределах рудоносных карбонатных пород (месторождение Сумсар)

- 1 — рудоносные карбонатные породы;
- 2 — рудное тело;
- 3 — интервалы опробования



дении Карасай. На рис. 165 изображено распределение цинка вокруг свинцово-цинкового рудного тела. В этом разрезе в подрудной части установлен участок выноса свинца, где содержание этого элемента существенно ниже фонового. Эти данные позволяют считать, что при формировании рудных тел происходило перераспределение рудных компонентов, в частности, свинца и цинка в пределах продуктивной пачки карбонатных пород, первоначально обогащенных этими элементами. Соседство участков выноса свинца, цинка и других элементов с рудными телами позволяет высказать предположение о заимствовании этих элементов из вмещающих пород при локализации оруденения. Таким образом, изложенные выше данные дают возможность предполагать, что в пространственной связи с рудными телами изученных стратиформных месторождений наблюдается отчетливое эпигенетическое перераспределение в карбонатных пластах как рудообразующих металлов, так и их спутников. С одной стороны, в результате мобилизации и выноса в процессе рудообразования их содержание в отдельных участках продуктивной толщи резко уменьшилось и стало ниже стабильного фонового содержания, а с другой,— непосредственно вокруг рудных тел оказались сформированными характерные ореолы этих металлов с ярко выраженной вертикальной зональностью.

Сопровождающее локализацию оруденения перераспределение элементов наиболее ярко иллюстрируется приведенными на рис. 163 кривыми распределения цинка. Анализ особенностей этих кривых показывает, что на участке месторождения в отличие от фонового кривая распределения характеризуется тремя максимумами: средний отвечает моде сингенетического рассеянного содержания цинка, что подтверждается кривой фонового участка. Правая мода отвечает рудным телам и окаймляющим их первичным ореолам, а левая фиксирует зоны интенсивного выноса цинка из продуктивных карбонатных пород. Если учесть также, что зоны выноса рудогенных элементов встречаются исключительно в связи с концентрированным оруденением, то можно сделать вывод о диплогенетическом (в понимании Т. Ловринга [101]) генезисе месторождения Сумсар, сущность которого сводится к гидротермальной мобилизации в рудные залежи металлов из карбонатных пород, сингенетично обогащенных этими элементами.

Другая группа месторождений, генезис которых постоянно вызывает споры, представлена рудными залежами вулканогенно-осадочного происхождения. Первичные геохимические ореолы месторождений этого типа имеют ярко проявленные и обусловленные специфическим генезисом оруденения черты, которые в необходимых случаях могут быть использованы для выяснения генетических особенностей тех или иных месторождений. Для иллюстрации специфических особенностей первичных ореолов рудных залежей вулканогенно-осадочного генезиса ниже приводится сравнение исследованных С. В. Григорьяном и Н. В. Рез-

Рис. 165. Распределение цинка в разрезе через рудное тело (месторождение Карагай)

- 1 — дизъюнктивные нарушения;
- 2 — границы рудоносных карбонатных пород;
- 3 — рудное тело;
- 4 — поля с содержанием ниже фонового;
- 5 — поле с фоновым содержанием;
- 6 — поля с содержанием выше фонового

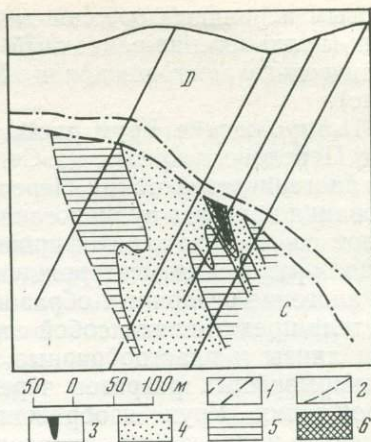
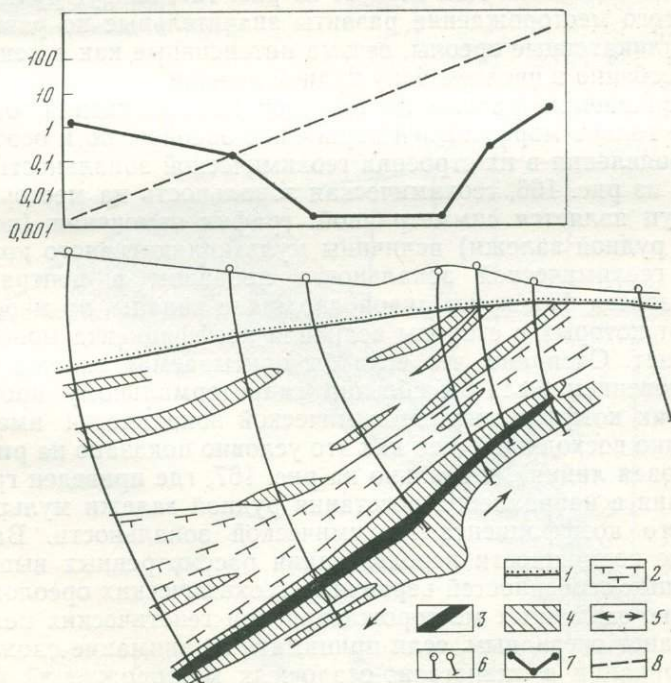


Рис. 166. Первичные ореолы и графики изменения коэффициента геохимической зональности по восстанию рудной залежи (месторождение Уруп, по Н. В. Резникову)

- 1 — граница пород нижней юры и девона;
- 2 — девонские отложения;
- 3 — рудная залежь;
- 4 — мультипликативные первичные ореолы (Cu·Zn·Pb·Ag·Mo·Co·As);
- 5 — направление движения рудоносных растворов;
- 6 — буровые скважины;
- 7 — график коэффициента геохимической зональности (Zn·Pb·Ag/Cu·Co·Mo);
- 8 — условный график коэффициента зональности ореолов гидротермального оруденения



никовым первичных ореолов медноколчеданного месторождения Уруп (вулканогенно-осадочный генезис) и колчеданно-полиметаллического месторождения Хандиза (гидротермальный генезис).

Месторождение Уруп расположено в северо-западной части зоны Передового хребта на Северном Кавказе. Определяющим металлогенический облик Передового хребта процессом рудообразования является вулканогенно-осадочное рудоотложение, связанное со спилито-кератофировой формацией [76]. Медноколчеданное оруденение месторождения Уруп локализовано в толще вулканогенно-осадочных образований девонского возраста. Рудные тела представляют собой согласные с вулканогенными породами линзы и пластообразные залежи. На рис. 166 по одному из типоморфных разрезов через Главную рудную залежь месторождения Уруп изображены мультипликативные ореолы элементов-индикаторов оруденения (медь, цинк, свинец, серебро, молибден, кобальт, мышьяк). Как видно из рис. 166, над рудной залежью (в висячем ее боку) ореолы практически отсутствуют, несмотря на существенное усиление ореолов, достигаемое при построении их мультипликативной модификации. Сплошные и достаточно интенсивные ореолы развиты в лежащем боку рудной залежи, что отчетливо отражает вулканогенно-осадочную природу оруденения. Противоположная картина установлена на месторождении Хандиза, гидротермальный генезис которого не подлежит сомнению. Как следует из рис. 167, вокруг рудной залежи этого месторождения развиты значительные по размерам мультипликативные ореолы, весьма интенсивные как в лежащем, так и особенно в висячем боку рудной залежи.

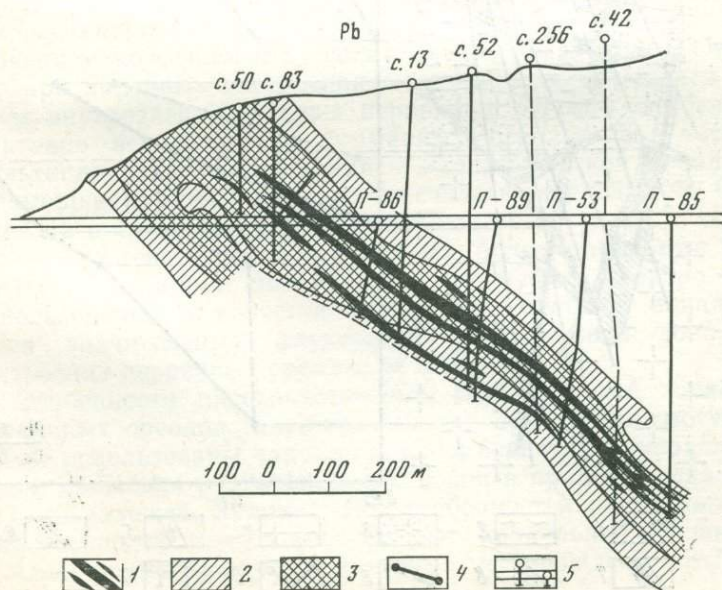
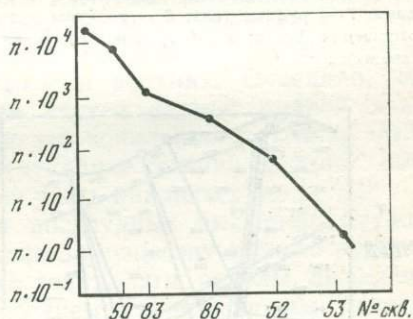
Сравниваемые разные по генезису месторождения отличаются не только морфологией первичных ореолов, но и особенностью проявления в их строении геохимической зональности. Как следует из рис. 166, геохимическая зональность на месторождении Уруп является симметричной: график изменения (по восстанию рудной залежи) величины мультипликативного коэффициента геохимической зональности провалом в центральной части разреза фиксирует рудоподводящие каналы, по мере удаления от которых в стороны величина коэффициента монотонно возрастает. Очевидно, что если бы описываемая залежь своим возникновением была бы обязана гидротермальному процессу, то график коэффициента геохимической зональности имел бы монотонно восходящий вид, как это условно показано на рис. 166 (штриховая линия), и реально на рис. 167, где приведен график изменения в направлении восстания рудной залежи мультипликативного коэффициента геохимической зональности. Важное значение возможности использования рассмотренных выше типоморфных особенностей первичных геохимических ореолов вулканогенно-осадочных месторождений при генетических построениях станет очевидным, если принимать во внимание сложность идентификации вулканогенно-осадочных месторождений и, как

следствие, возникновение острых научных дискуссий по генетическим вопросам, особенно в случаях конвергентных месторождений, яркими представителями которых, как известно, являются колчеданные месторождения.

Рассматривая особенности первичных ореолов месторождений различного генезиса, авторы не ставили перед собой задачу убедить читателей в вулканогенно-осадочном генезисе Урупского месторождения или же в диплогенетической природе рудных залежей в карбонатных породах. Назначение приведенных выше примеров в показе высокой информативности первичных геохимических ореолов в решении сложных задач генезиса рудных месторождений с целью привлечь внимание специалистов к первичным геохимическим ореолам как источнику ценнейшей генетической информации. Наряду с решением рассмотренной выше задачи определения генезиса оруденения, результаты изу-

Рис. 167. Первичный ореол свинца и график изменения коэффициента геохимической зональности

- 1 — рудные тела;
- 2, 3 — первичные ореолы свинца (3 — поля повышенных содержаний свинца);
- 4 — график мультипликативного коэффициента зональности ($Pb \cdot Ag \cdot Ba / Co \cdot Sn \cdot Mo$);
- 5 — буровые скважины и горные выработки

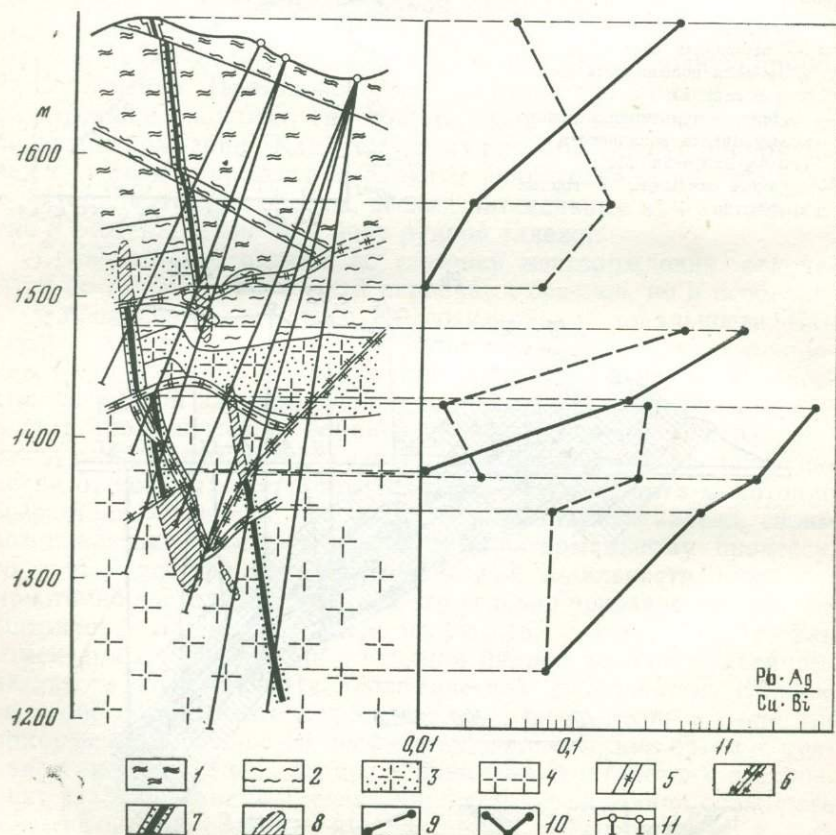


чения первичных геохимических ореолов во многих случаях с успехом могут быть использованы для решения и более частных задач, обычно возникающих при расшифровке условий формирования тех или иных месторождений.

Особенности развития первичных геохимических ореолов, в частности, могут быть использованы для правильной увязки данных горных и буровых работ при оконтуривании рудных тел. На рис. 168 изображен один из первых вариантов увязки рудных подсечений на медно-висмутовом месторождении Тарызкан (Рудный Кармазар, Средняя Азия): единая крутопадающая рудная

Рис. 168. Геологический разрез и графики изменения с глубиной величины коэффициента зональности (месторождение Тарызкан)

1 — фельзит-порфиры; 2 — туфолавы фельзит-порфиров; 3 — туфы андезито-дацитовые; 4 — андезито-дацитовые порфириты; 5 — дайки диабазовых порфиритов; 6 — зона разлома; 7 — рудные тела; 8 — контуры рудных зон в новой интерпретации; 9 — график отношения Ag/Cu ; 10 — график отношения $Pb \cdot Ag/Cu \cdot Bi$; 11 — опробованные буровые скважины



зона разбита на три блока, смещенных относительно друг друга пострудными подвижками. Однако, как показали результаты изучения особенностей первичных геохимических ореолов, приведенный на рис. 168 вариант увязки данных разведки не отражает реальную картину локализации оруденения на месторождении. В действительности месторождение представлено тремя самостоятельными кулисно расположенными рудными телами, каждое из которых сопровождается своими первичными ореолами с отчетливой вертикальной зональностью, повторяющейся в строении ореолов каждого из рудных тел. Для иллюстрации особенностей первичных ореолов на рис. 168 приведены графики изменения с глубиной величины мультипликативного коэффициента геохимической зональности вида серебро-свинец/медь \times висмут. В этом коэффициенте использованы основные элементы-индикаторы медно-висмутового оруденения. Эти графики однозначно указывают на самостоятельный характер рудных тел: как следует из рис. 168, величины мультипликативного коэффициента зональности по всем рудным телам укладываются в строго определенный интервал значений: сотые доли единицы в нижних частях рудных тел и десятые — в верхних. Очевидно, что в случае пострудного смещения частей единой рудной зоны близкими значениями коэффициента зональности должна была бы характеризоваться пара следующих сечений рудных зон: нижняя часть верхнего и верхняя часть нижнего рудных тел.

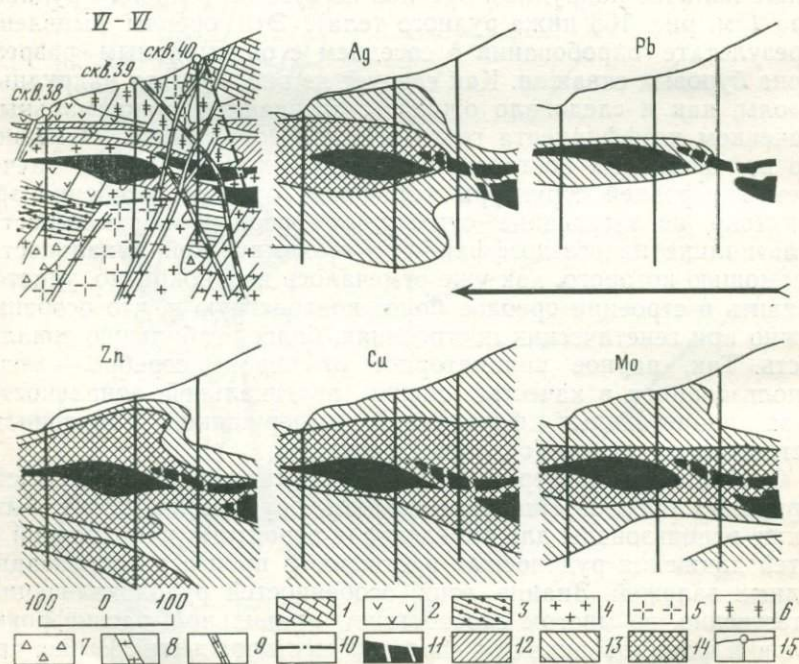
Доказательством отсутствия пострудных смещений служит также наличие надрудных ореолов по существу слепого рудного тела (см. рис. 168 ниже рудного тела). Эти ореолы выявлены в результате опробования в соседнем с описываемым разрезе керна буровых скважин. Как следует из рис. 168, эти надрудные ореолы, как и следовало ожидать, отличаются максимальным значением коэффициента геохимической зональности. Отметим, что при подобных построениях, связанных с детальным изучением внутренней структуры первичных ореолов, особенно эффективно использование суммарных ореолов и, в частности, мультипликативного коэффициента геохимической зональности, с помощью которого, как уже отмечалось неоднократно, удается выявить в строении ореолов более контрастную и, что особенно важно при генетических построениях, более стабильную зональность. Так, парное индикаторное отношение серебро — медь, использованное в качестве оценки вертикальной зональности, из-за значительных флуктуаций выдержанной зональности в строении первичных ореолов не вскрыло.

Особенности пространственной геохимической зональности первичных ореолов гидротермального оруденения могут быть также использованы для определения вероятных направлений и путей движения рудоносных растворов в процессе локализации рудных залежей. Знание этих особенностей рудолокализации, естественно, во многом способствует правильной расшифровке условий формирования тех или иных месторождений. Выше, при

описании зональности первичных ореолов различных по составу месторождений, неоднократно отмечалось, что контрастная вертикальная зональность в строении первичных ореолов рудных тел крутого падения свидетельствует о восходящем характере рудоносных растворов. В тех случаях, когда направление движения растворов близгоризонтальное, осевая зональность контрастно проявляется по горизонтали. Именно такой случай изображен на рис. 169, где в вертикальном поперечном разрезе через медно-молибденовое месторождение Сарычеку (Средняя Азия) оконтурены первичные ореолы, развитые вокруг слепого рудного тела субгоризонтального залегания. На этом месторождении комплекс пород, представленный позднекаледонскими аляскитами, андезитовыми и андезит-дацитовыми порфирами, кварцевыми порфирами, серыми гранодиоритами нижнего девона, песчано-карбонатными породами верхнего девона прорваны интрузиями розовых гранодиоритов, сиенито-диоритпорфирами пермского возраста и самыми молодыми по возрасту дайками

Рис. 169. Первичные ореолы вокруг рудного тела пологого залегания (месторождение Сарычеку)

1 — известняки; 2 — кварцевые порфиры; 3 — андезитовые порфиры; 4 — гушайские гранодиориты; 5 — розовые гранодиориты; 6 — серые гранодиориты; 7 — аляскиты; 8 — граносиенит-порфиры; 9 — гранодиорит-порфиры; 10 — дизъюнктивные нарушения; 11 — рудное тело; 12—14 — первичные ореолы (14 — поля повышенных содержаний элементов); 15 — буровые скважины



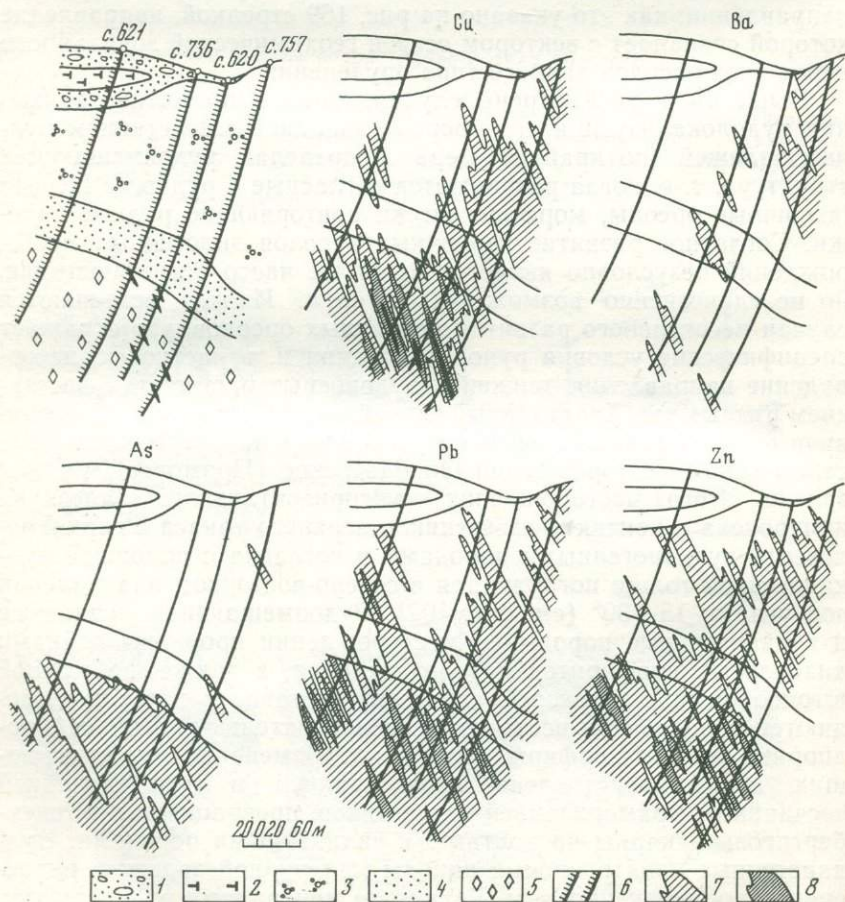
гранодиорит-порфириров и лампрофириров. Оруденение развивается в зонах интенсивной трещиноватости в кварцевых порфирах и розовых гранодиоритах. Минеральный состав рудных тел сравнительно прост: вместе с халькопиритом, молибденитом присутствуют пирит, галенит, сфалерит, барит, флюорит, кварц, редко встречаются аргентит и висмутин.

Как видно из рис. 169, первичные ореолы серебра и молибдена — крайних членов ряда зональности элементов — индикаторов этого типа оруденения — выявляют отчетливую зональность в строении ореолов, вытянутых по горизонтали как и рудная залежь. По восстанию рудной залежи с юга на север сужается ореол молибдена, но и резко усиливается ореол серебра — типичного элемента-индикатора фронтальных (головных) частей первичных ореолов. Такой характер осевой геохимической зональности однозначно свидетельствует о том, что рудообразующие растворы, по всей вероятности, поступали с юга и по восстанию рудной залежи двигались в субмеридиональном направлении, как это указано на рис. 169 стрелкой, направление которой совпадает с вектором осевой геохимической зональности первичных ореолов данного типа оруденения.

Выше были рассмотрены случаи, когда направление движения рудолокализирующих растворов совпадает с восстанием рудных залежей (по крайней мере в пределах рудовмещающих структур), т. е. когда развиваются согласные с рудными телами первичные ореолы, морфологически повторяющие рудные залежи. Согласное развитие первичных ореолов эндогенных месторождений безусловно является наиболее часто встречающимся, но не единственно возможным случаем. Иногда встречаются случаи несогласного развития первичных ореолов, что отражает специфические условия рудообразования и, в частности, несопадение направления движения рудоносных растворов с восстанием рудных тел. Характерный случай несогласного развития первичных геохимических ореолов установлен на скарново-полиметаллическом месторождении Николаевское (Приморье). Рудная залежь этого месторождения субгоризонтального залегания приурочена к контакту известняков верхнего триаса с верхнемеловыми вулканогенными породами и согласно с подошвой вулканогенной толщи погружается в северо-восточном направлении под углами 15—30° (см. рис. 102). Рудовмещающие осадочные и вулканогенные породы на месторождении прорваны дайками диабазовых порфириров крутого падения, а также небольшой штокообразной интрузией сложного состава, в которой выделяются образования нескольких последовательных фаз (габбродиориты, гранит-порфиры, фельзиты). Изменения рудовмещающих пород представлены хлоритизацией и серицитизацией песчаников, мраморизацией известняков, превращенных в геденбергитовые скарны на контакте с силикатными породами. Вулканогенные и интрузивные породы над рудной залежью интенсивно пропилитизированы. Главными минералами руд являются

сфалерит, галенит, в меньших количествах в рудах содержатся пирит, пирротин, арсенопирит.

Обработка результатов выполненного на месторождении геохимического опробования (в основном керн буровых скважин) позволила установить, что вокруг рудной залежи развиты широкие и контрастные первичные ореолы типоморфных для скарново-полиметаллического оруденения элементов-индикаторов. На рис. 102 по одному из типоморфных разрезов через рудную залежь месторождения изображены первичные ореолы основных элементов-индикаторов. Характерной особенностью ореолов является их несогласное развитие: при субгоризонтальном залегании рудной залежи, первичные ореолы резко вытянуты по вертикали — вертикальная протяженность первичных ореолов превосходит 900—1000 м (глубина залегания рудной залежи) и, по всей вероятности, значительно, поскольку на поверхности первичные ореолы достаточно интенсивные и широкие, что позволя-

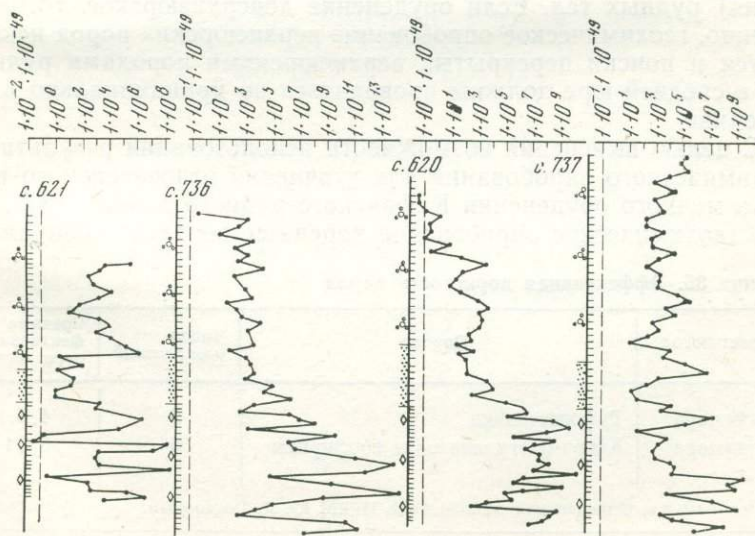


ет считать, что определенную часть надрудных ореолов уничтожила эрозия. Такая морфология первичных ореолов однозначно указывает на восходящий характер рудоотлагавших растворов. Последние, поднимаясь по крутопадающим нарушениям, формировали протяженные надрудные ореолы, тогда как промышленные руды отлагались в пределах горизонта известняков, благоприятных для локализации оруденения. Именно пологое залегание этого благоприятного горизонта определяло субгоризонтальный характер рудной залежи и, как следствие, развитие несогласных первичных ореолов. О строго восходящем движении рудоносных растворов на Николаевском месторождении свидетельствует также ограниченная ширина надрудных первичных ореолов, которая не превышает горизонтальную протяженность рудной залежи, в отличие от согласных ореолов, для которых соотношение вертикальной и горизонтальной протяженности противоположное (см. рис. 169, месторождение Сарычеку, а также рис. 94, месторождение Тутлы I).

При расшифровке условий формирования тех или иных месторождений во многих случаях возникают трудности в определении времени формирования оруденения, и в частности, относительно возраста оруденения, знание которого обычно имеет принципиальное значение как для понимания механизма формирования месторождения, так и выбора рациональной методики

Рис. 170. Первичные ореолы вокруг рудных жил и графики мультипликативных ореолов (месторождение Кафан)

1 — четвертичные отложения; 2 — базальты; 3 — туфоконгломераты; 4 — туфопесчаники; 5 — кварцевые порфириты; 6 — опробованные интервалы и рудные тела; 7, 8 — первичные ореолы (8 — поля повышенных содержаний элементов)



поисков подобных месторождений. Исследования показывают, что результаты изучения первичных ореолов в ряде случаев могут быть привлечены для решения этой задачи. В качестве примера рассмотрим опыт использования особенностей развития первичных ореолов для определения возраста оруденения медного месторождения Кафан, расположенного в юго-восточной части Армянской ССР. На этом месторождении медное оруденение залегает в толще среднеюрских (байос) вулканогенных пород, представленных кварцевыми, кварцево-плагиоклазовыми и плагиоклазовыми порфиритами. В туфогенно-осадочной толще верхней юры (оксфорд-кимеридж) оруденения не встречено. Несмотря на то что месторождение известно давно (систематическая его разработка начата в 1846 г.), до сих пор не существует единой точки зрения о возрасте оруденения. Одни исследователи возраст промышленного медного оруденения считают доверхнеюрским [17], другие — третичным [3]. Очевидно, что правильное определение возраста оруденения в данном случае имеет не только теоретическое (генезис оруденения), но и важное для месторождения практическое значение, ибо определяет направление дальнейших поисковых работ. При действительном более молодом третичном возрасте не исключено обнаружение промышленного оруденения в толще верхнеюрских пород, занимающих в пределах рудного района обширные площади. Более древний возраст оруденения автоматически исключает эти породы из сферы поисковых и разведочных работ. Знание возраста оруденения существенным образом влияет и на выбор рациональной методики поисковых работ. Применительно к условиям Кафанского рудного поля важным вопросом является методика поисков локализованных в среднеюрских породах (наиболее благоприятных для локализации промышленного медного оруденения) рудных тел. Если оруденение доверхнеюрское, то, естественно, геохимическое опробование верхнеюрских пород исключается и поиски перекрытых верхнеюрскими породами рудных тел в средней юре должны проводиться по принципиально иной методике.

С целью выяснения возможности использования результатов геохимического опробования для уточнения относительного возраста медного оруденения Кафанского рудного района проводилось геохимическое опробование коренных пород по специально

Таблица 35. Эффективная пористость пород

Возраст пород	Порода	Число определений	Средняя эффективная пористость, %
Верхняя юра	Туфопесчаники	9	4,6
Средняя юра	Кварц-плагиоклазовые порфириты	6	6,04

Примечание. Определения выполнены в ИГЕМ Ю. А. Розановым.

выбранным разрезам. На рис. 170 приведен один из таких разрезов, по которому буровыми скважинами вскрыт достаточно полный для описываемого района разрез средне- и верхнеюрских пород с медной минерализацией в продуктивном горизонте среднеюрских вулканогенных пород. Как видно из рис. 170, ореолы меди и ее элементов-спутников проникают в горизонт верхнеюрских туфопесчаников. Эта особенность ореолов наиболее четко проявлена для меди, свинца и цинка (см. рис. 170) и определено указывает на более молодой возраст оруденения. Развитие первичных ореолов в породах верхней юры более отчетливо фиксируется графиками (рис. 170).

Причиной относительно слабого развития ореолов в породах верхней юры, так же как и отсутствия в них промышленного медного оруденения, по всей вероятности, является то обстоятельство, что в данном случае верхнеюрские отложения и, в особенности, туфопесчаники, послужили экраном для рудоносных растворов по причине прежде всего неблагоприятных для рудоотложения физико-механических свойств. Как следует из табл. 35, эффективная пористость туфопесчаников (по сравнению с породами средней юры) существенно меньше. Как показали другие испытания образцов пород (определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга), верхнеюрские породы менее склонны к трещинообразованию, а следовательно, и менее благоприятны для рудоотложения.

1. Абрамсон Г. Я., Григорян С. В. О полиформационных ореолах месторождения Тырнауз.— В кн.: Литогеохимические методы при поисках скрытого оруденения. М., 1972, с. 20—21.
2. Авессаломова И. А., Алексинская Л. Н. К вопросу о биогеохимических исследованиях в районе бериллиевого месторождения.— В кн.: 5-я научная конференция молодых ученых ИМГРЭ. М., 1967, с. 24—25.
3. Акопян В. Т., Қазарян А. Г., Шемян Г. Г. Особенности геологии и структуры Кафанского месторождения.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1969, № 5.
4. Албул С. П. Рудопоисковая гидрогеохимия. М.: Изд. Ун-та Дружбы народов, 1969, 344 с.
5. Антропова Л. В. Формы нахождения элементов в ореолах рассеяния рудных месторождений. М.: Недра, 1975, 144 с.
6. Барнс Г. Л., Чаманский Г. К. Растворимость и перенос рудных минералов.— В кн.: Геохимия рудных месторождений. М.: Мир, 1970 г.
7. Барсуков В. Л. Основные черты геохимии олова. М.: Наука, 1974.
8. Барсуков В. Л., Волосов А. Г. Геохимический метод прогноза оруденения на глубину и обнаружения слепых рудных тел на сульфидно-касситеритовых месторождениях.— Геохимия, 1967, № 11.
9. Барсуков В. Л., Волосов А. Г. Новые пути в разработке геохимических методов прогноза оруденения на глубину (на примере оловорудных месторождений).— Геол. рудн. месторожд. 1, 1968, 10, № 6.
10. Бартон П. Б., Дж. Скиннер. Устойчивость сульфидных минералов.— В кн.: Геохимия рудных месторождений. М.: Мир, 1970.
11. Бекжанов Г. Р., Ермакбаев А. Е., Сердюков М. К. Состояние и результаты литохимических поисков в Казахстане.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата: Наука, 1972, с. 8—14.
12. Беус А. А., Беренгилова В. В., Грабовская Л. И. и др. Геохимические поиски эндогенных месторождений редких элементов, Наука, 1968.
13. Беус А. А., Григорян С. В. Геохимические методы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. М.: Недра, 1975, 286 с.
14. Бородаевская М. Б., Вахрушев М. И., Контарь Е. С. и др. Геологическое строение Гайского рудного поля и условия локализации в нем медноколчеданного оруденения. Труды ЦНИГРИ, 1968, вып. 83, 214.
15. Бродский А. А. Основы гидрогеохимического метода поисков сульфидных месторождений. М.: Недра, 1964, 260 с.
16. Бугров В. А. Глубинные литохимические съемки при поисках рудных месторождений.— Разведка и охрана недр., 1968, № 2.
17. Ванюшин С. С., Лейе Ю. А., Малхасян Э. Г. Кафанское медное месторождение, Ереван: Изд. НТО Цветмета, 1957, 182 с.

18. *Викторов С. В.* Биологические индикаторы в геологии. Усп. соврем. биол., 1947, 23, вып. 2.
19. *Викторов С. В.* Использование геоботанического метода при геологических и гидрогеологических исследованиях. М.: Изд-во АН СССР, 1955, 204 с.
20. *Виноградов А. П.* Поиски рудных месторождений по растениям и почвам.—Тр. биогеохим. лабор., 1954, 10.
21. *Виноградов А. П.* Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры.—Геохимия, 1962, № 7, с. 641—664.
22. *Глазовская М. А.* О геохимических принципах классификации природных ландшафтов.—В сб.: Вопросы географии, № 59 (геохимия степей и пустынь). М.: Географгиз, 1962.
23. *Глебовская В. С., Глебовский С. С.* О возможности применения газовой съемки для поисков сульфидных месторождений.—В кн.: Вопросы рудной геофизики, вып. 1. Госгеолтехиздат, 1960.
24. *Голева Г. А.* Гидрогеохимические поиски скрытого оруденения. М.: Недра, 1968, 292 с.
25. *Голева Г. А., Крайнов С. Р., Соколов И. Ю.* Методические указания по гидрогеохимическим поискам рудных месторождений. М.: Недра, 1968.
26. *Голева Г. А.* Гидрогеохимия рудных элементов. М.: Недра, 1977.
27. *Головин А. А.* Эндогенные геохимические ореолы колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая и критерии их оценки. Автореферат дис. . . . канд. геол.-мин. наук. М.: ИМГРЭ, 1978.
28. *Грабовская Л. И.* Биогеохимические методы поисков. М.: Изд. ВГФ, 1965, 124 с.
29. *Григорян С. В.* Эндогенные ореолы рассеяния химических элементов вокруг свинцово-цинковых рудных тел. В кн.: Эндогенные ореолы рассеяния некоторых гидротермальных месторождений. М.: Госгеолтехиздат, 1963, с. 16—42.
30. *Григорян С. В.* Геохимические методы при поисках эндогенных рудных месторождений. М.: Изд. ИМГРЭ, 1974, 216 с.
31. *Григорян С. В.* Об использовании первичных ореолов в закрытых районах. В кн.: Результаты геохимических и геофизических исследований по выявлению редкометального и полиметаллического оруденения в районе Воронезского кристаллического массива. М.: Изд. ТГУЦР, 1977, с. 8—13.
32. *Григорян С. В., Абрамсон Г. Я., Дергачева Г. М. и др.* Литохимические методы поисков месторождений вольфрама. М. Изд. ИМГРЭ, 1975, 104 с.
33. *Григорян С. В., Виноградова Н. А., Егоров А. П. и др.* Литохимические методы поисков редкометальных пегматитов. М. Изд. ИМГРЭ, 1976, 78 с.
34. *Григорян С. В., Гольдмахер И. В.* Особенности использования геохимических критериев при столбовом характере оруденения.—В кн.: Использование геохимических методов при поисках и разведке месторождений цветных металлов. М.: изд. ИМГРЭ, 1979, с. 111—122.
35. *Григорян С. В., Каблуков А. Д.* Об использовании корреляционного анализа для интерпретации данных геохимического опробования.—Геол. рудн. месторожд., 1965, 7, № 4.
36. *Григорян С. В., Лаверов Н. П.* О некоторых особенностях первичных ореолов полиметаллического оруденения в докембрии.—В кн.: Научные

основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых и оценки потенциальной рудоносности магматических и метаморфических комплексов докембрия. Апатиты. Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1972, с. 158—163.

37. Григорян С. В., Лугов С. Ф., Бельчанская Л. Н. и др. Литохимические методы при поисках и разведке эндогенных месторождений олова. М. Изд. ИМГРЭ, 1974, 96 с.
38. Еремеев А. Н. Принципы методики глубинных поисков погребенных месторождений.— В кн.: Глубинные поиски рудных месторождений. М., 1973, с. 54—63.
39. Ермолаев М. Е. Применение геохимических методов поисков месторождений пегматитов в условиях субарктической зоны в пределах Северо-Запада Европейской части СССР. В кн.: «Докл. научной сессии». Изд-во ЛГУ, 1959.
40. Жариков В. А. Экспериментальное и теоретическое исследование фильтрационного эффекта. III. Электрокинетический механизм и возможная геохимическая роль.— В кн.: Метасоматизм и другие вопросы физ.-хим. петрологии: М.: Наука, 1967.
41. Каблуков А. Д., Вертепов Г. И. Ореолы рассеяния элементов вокруг урановых рудных тел.— Геология рудных месторожд., 1960, № 2.
42. Каблуков А. Д., Сочеванов Н. И., Баранов Э. Н. и др. Использование ореолов рассеяния урана и его спутников при поисках и разведке гидротермальных урановых месторождений. М.: Наука, 1964, 234 с.
43. Калита Е. Д. К вопросу об ореолах рассеяния лития, рубидия и бериллия. В кн.: Материалы по геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
44. Квятковский Е. М. Литохимические методы поисков эндогенных рудных месторождений. Л., 1977.
45. Квятковский Е. М., Крицук И. Н. Количественная интерпретация вторичных геохимических ореолов рассеяния рудных месторождений.— В сб.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата: Наука, 1972, с. 114—126.
46. Ковалев Г. Н. О диффузии по границам зерен в горной породе в присутствии воды.— Докл. АН СССР, 1971, 197, № 6.
47. Ковалевский А. Л. Биогеохимические поиски рудных месторождений. М.: Недра, 1974.
48. Лапухов А. С. Диффузионный перенос свинца и цинка сквозь водонасыщенные горные породы.— В кн.: Физика и физико-химия рудообразующих процессов. Новосибирск: Наука, 1971.
49. Ларионов Г. Ф., Свешников Г. Б. и др. Гидрогеохимический метод поисков рудных месторождений в Центральном Казахстане. Л.: Недра, 1971.
50. Магнуссон Ч. Геология, парагенезис и запасы руд зарубежных месторождений свинца и цинка. Изд-во иностр. лит., 1951.
51. Малюга Д. П. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. М.: Изд-во АН СССР, 1963, 264 с.
52. Несвижская Н. М., Сагт Ю. Е. Геохимические поиски перекрытых сульфидных месторождений по наложенным ореолам (методические рекомендации). М.: изд-во ИМГРЭ, 1975, 80 с.

53. Овчинников Л. Н. Аспекты и методы изучения эндогенного рудообразования.— Изв. АН СССР. Серия геол., 1965, № 6.
54. Овчинников Л. Н. Механизм и термодинамические условия магматогенного рудообразования.— Геол. рудн. месторожд., 1967, 9, № 5.
55. Овчинников Л. Н. Механизм формирования первичных геохимических ореолов и рудных тел.— В кн.: Проблемы эндогенного рудообразования и металлогении. Новосибирск: Наука, 1976.
56. Овчинников Л. Н., Баранов Э. Н. Эндогенные геохимические ореолы колчеданных месторождений.— Геол. рудн. месторожд., 1970, № 2.
57. Овчинников Л. Н., Григорян С. В. Закономерности состава и строения первичных геохимических ореолов сульфидных месторождений. В кн.: Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих месторождений. Иркутск. Изд. СибГЕОХИ, 1970, с. 3—36.
58. Овчинников Л. Н., Григорян С. В., Баранов Э. Н. Зональность первичных геохимических ореолов гидротермальных месторождений и их поисковое значение.— Изв. вузов. Геология и разведка, 1973, № 10.
59. Овчинников Л. Н., Кременецкий А. А. Пегматиты — завершающий этап гидротермального метасоматоза кальциево-магнезиальных пород.— В кн.: Метасоматизм и рудообразование. Л.: Наука, 1978.
60. Овчинников Л. Н., Челищев Н. Ф., Наджарян В. Н. Возможные физико-химические факторы дифференциации металлов при рудообразовании.— В кн.: Очерки современной геохимии и аналитической химии. М.: Наука, 1972.
61. Овчинников Л. Н., Шляпников Д. С., Шур А. С. Мобилизация и перенос вещества при эндогенном рудообразовании.— В кн.: Проблемы генезиса руд. Материалы МГК, XXII сессия. М.: Недра, 1964.
62. Ольшанова К. М., Копылова В. Д., Морозова Н. М. Осадочная хроматография. М.: Наука, 1968.
63. Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М.: Недра, 1968.
64. Перельман А. И. Геохимия эпигенетических процессов (зоны гипергенеза). М.: Недра, 1968, 332 с.
65. Поликарпочкин В. В. Вторичные ореолы и потоки рассеяния. Новосибирск, 1976, 408 с.
66. Поликарпочкин В. В., Поликарпочкина Р. Т. Биогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых. М.: Наука, 1964, 98 с.
67. Поспелов Г. Л. Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск: Наука, 1973.
68. Росляков Н. А. Зоны окисления сульфидных месторождений Западного Алтая. Новосибирск: Наука, 1970.
69. Рубо Г. Л. Некоторые геохимические критерии различия эндогенных ореолов, связанных с рудными телами от зон рассеяния рудной минерализации. В кн.: Геохимические методы при геологосъемочных и поисково-разведочных работах. М.: изд-во ИМГРЭ, 1974, с. 23—41.
70. Сагт Ю. Е., Несвижская Н. И. Изучение форм нахождения элементов во вторичных ореолах. Изд. ОЦНТИ, ВИЭМС, М., 1974.
71. Сауков А. А. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Изд. Мос. ун-та, 1963, 248 с.

72. Сафронов Н. И. К вопросу об «ореолах рассеяния» месторождений полезных ископаемых и их использовании при поисках и разведке. Проблемы сов. геол., 1936, № 4.
73. Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., 1971, 216 с.
74. Смирнов В. И. Проблемы поисков рудных месторождений, не имеющих выхода на поверхность земли.— Сов. геол., 1955, № 49.
75. Смирнов В. И. Региональная и локальная эндогенная рудная зональность.— В кн.: Проблемы постмагматического рудообразования. Т. II. Прага, 1965.
76. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. М.: Недра, 1976, 688 с.
77. Смирнов С. С. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
78. Соловов А. П. Основы теории и практики металлометрических съемок. Алма-Ата, 1959, 266 с.
79. Соловов А. П. Классификация ореолов рассеяния рудных месторождений.— В кн.: Глубинные поиски рудных месторождений. М.: 1963.
80. Соловов А. П. Оценка рудопроявлений по их ореолам рассеяния. Изв. АН СССР. Сер. геол., 1965, 3.
81. Соловов А. П. Поисковые сети и вероятные резервы оруденения в полузакрытых районах.— В кн.: Глубинные поиски рудных месторождений, вып. 2. М., 1968.
82. Соловов А. П., Досанова Б. А., Кошелева И. А. Анализ результатов поисковых литохимических съемок при прогнозно-металлогенических исследованиях.— Вест. Моск. ун-та. Сер. геол., 1970, № 4.
83. Суслова С. И. Первичные ореолы редких щелочей и их значение при поисках «слепых» редкометалльных пегматитов.— В кн.: Вопросы магматизма, метаморфизма и рудообразования. М.: Недра, 1963.
84. Тарасов В. А. Курусайское рудное поле. Ташкент: ФАН, 1967, 185 с.
85. Ткалич С. М. Фитогеохимический метод поисков месторождений полезных ископаемых. Л.: Недра, 1970.
86. Удодов П. А., Шварцев С. А. и др. Методическое руководство по гидрогеохимическим поискам рудных месторождений. М.: Недра, 1973.
87. Фридман А. И. Газовая съемка при поисках руд и геологическом картировании. М.: изд. ИМГРЭ, 1975, 88 с.
88. Фурсов В. З. Методика измерений паров ртути при поисках ртутных месторождений. М.: изд. ИМГРЭ, 1975.
89. Холланд Г. Д. Некоторые приложения термохимических данных к проблемам рудных месторождений. Минеральные ассоциации и состав рудообразующих флюидов.— В кн.: Термодинамика постмагматических процессов. М.: Мир, 1968.
90. Холланд Г. Д. Жильные минералы в гидротермальных месторождениях.— В кн.: Геохимия рудных месторождений. М.: Мир, 1970.
91. Хорин Г. И., Мясников И. Ф., Сайчаков А. Н. Опыт оценки геохимических аномалий, обусловленных зонами рассеянной минерализации.— В кн.: Геохимические методы при геолого-съёмочных и поисково-разведочных работах. М.: изд. ИМГРЭ, 1974, с. 41—51.
92. Щерба Г. Н. Грейзеновые месторождения.— В кн.: Генезис эндогенных рудных месторождений. М., Недра, 1968, с. 378—440.
93. Эммонс В. Изменение первичного оруденения с глубиной. ОНТИ, 1933.

94. Яцимирский К. Б. К вопросу об изменении свободной энергии и энтропии при реакциях комплексообразования.—Журн. физ. химии, 1951, 25, вып. 2.
95. Barns H. L. Mechanisms of mineral zoning.—Econ. Geol., 1962, 57, N 1.
96. Bignell R. D., Gronan D. C., Nooms G. S. Metal dispersion in the Red Sea as an aid to marine geochemical exploration—Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. B Appl. earth. Sci), 1976, nov. p. B274—B278.
97. Carrels R. M., Drever R. M., Howland A. L. Diffusion of ions through intergranular spaces in water-saturated rocks.—Bull. Geol. Soc. Amer., 1949, 66, N 12.
98. Duffel S. Diffusion and its relation to ore deposition.—Econ. Geol., 1937, 32.
99. Hawkes H. E. Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits (Book Review). Natural Resources Forum, v. 2, N 2, January, 1978.
100. Kharaka G. K., Berry F. A. F. Simultaneous flow of water and solutes through geological membranes.—Experimental investigation. Geochim. et Cosmochim. Acta, 1973, 37, N 12.
101. Lovering T. S. Epigenetic, Diagenetic, Syngenetic and Lithogenetic Ore Deposits.—Economic Geology, 55.
102. Lowell I. D., Gilbert I. M. Lateral and vertical alteration-mineralisation zoning in porphyry ore deposits.—Econ. Geol., 1970, 65, N 4.
103. Niccolini N. K. Chemical Constitution of Odour.—Arch. Ital. Sci. Formacol. 6, 1937.
104. Skinner B. J., Barton P. B. Genesis of mineral deposits.—Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 1973, 1, Palo Alto.
105. Strubel I. Hydrothermale Zonungen. Experimentelle Untersuchungsergebnisse über hydrothermalsynthetische Lösungen bis 600°C und 2000 bar. Geol.—Rundschau, 1968, 58, H. 1.
106. Wehrenberg I. P., Silverman A. Studies of the base metal diffusion in experimental and natural systems.—Econ. Geol., 1965, 60.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Глава I	
ПЕРВИЧНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ РУДНЫХ МЕСТО- РОЖДЕНИЙ	8
Методы изучения	8
Магматические месторождения	10
Пегматитовые месторождения	15
Скарновые месторождения	25
Альбитито-грейзеновые месторождения	34
Плутогенные гидротермальные месторождения	40
Колчеданные месторождения	48
Глава II	
ВТОРИЧНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕ- МЕНТОВ-ИНДИКАТОРОВ ОРУДЕНЕНИЯ	68
Литохимические ореолы	68
Газовые ореолы	96
Биогеохимические ореолы	110
Гидрохимические ореолы рудных месторождений	122
Глава III	
КРИТЕРИИ И МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОХИМИЧЕ- СКИХ АНОМАЛИЙ	133
Оценка уровня эрозионного среза геохимических аномалий	133
Идентификация зон рассеяния рудной минерализации	188
Расшифровка полиформационных аномалий	204
Оценка масштаба оруденения	215
Глава IV	
УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКОВЫХ РАБОТАХ	239

Глава V

ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ — ИНДИКАТОРЫ ГЕНЕЗИСА ОРУДЕНЕНИЯ	265
Механизм и закономерности формирования первичных геохимических ореолов	265
Расшифровка условий локализации оруденения по геохимическим данным	292
ЛИТЕРАТУРА	310

ВАЛЕРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ БАРСУКОВ,
СЕРГЕЙ ВАГАРШАКОВИЧ ГРИГОРЯН,
ЛЕВ НИКОЛАЕВИЧ ОВЧИННИКОВ

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Утверждено к печати
Ордена Ленина институтом геохимии
и аналитической химии им. В. И. Вернадского

Редактор
Г. Х. Ян,

Редактор издательства
И. А. Клинова,

Художник
А. Г. Кобрин,

Художественный редактор
С. А. Литвак,

Технический редактор
И. Н. Жмуркина,

Корректоры А. Б. Васильев, Р. А. Тютина

ИБ № 17240

Сдано в набор 04.08.80.
Подписано к печати 16.12.80.
Т-19345. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага типографская № 1.
Гарнитура литературная.
Печать высокая.
Усл. печ. л. 20,5. Уч.-изд. л. 22,1.
Тираж 3000 экз. Тип. зак. 3366.
Цена 2 р. 50 к.

Издательство «Наука»
117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90
2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НАУКА» ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ

СПРАВОЧНИК «МИНЕРАЛЫ», т. III, вып. 2 и 3. 7 р. 50 к.

Вып. 2. Силикаты кольцевой и цепочечной структуры.

Вып. 3. Силикаты ленточной структуры.

Справочник включает описание силикатов кольцевой, цепочечной и ленточной структуры, к которым относятся многие порообразующие минералы редких элементов. Критически использованы опубликованные в СССР и за рубежом новейшие данные по рентгеноструктурным, химическим, оптическим, термическим, физико-химическим и другим свойствам минералов, сведения об их нахождении в природе, синтезе и практическом использовании.

Книга рассчитана на минералогов, петрографов, геохимиков, геологов.

ОЧЕРКИ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ПЛАНЕТОЛОГИИ. 3 р. 50 к.

Книга представляет собой результат обобщения новых данных о планетах земной группы, полученных в результате интенсивных исследований планет в последние годы космическими и наземными средствами, и состоит из двух частей. В первой части дается описание внутренних планет и малых тел Солнечной системы, опирающееся на накопленную в настоящее время богатую информацию. Вторая часть посвящена сравнительно планетологическому анализу процессов формирования и развития планетных тел, а также следствиям, вытекающим из общих законов их развития применительно к истории Земли.

Книга рассчитана на геологов, геохимиков, астрономов, других специалистов в области наук о Земле.

Шумилов Ю. В.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ЛИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ
РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЯ. 2 р. 70 к.

Книга содержит изложение физико-химических основ современной теории россыпеобразования. На обширном геологическом и экспериментальном материале рассмотрены процессы выветривания рудного вещества различных россыпеобразующих формаций, литогенетические параметры аллювиального процесса и механизмы концентрации ценных минералов. Дан анализ проблем континентального литогенеза и эволюции терригенного материала в связи с россыпеобразованием.

Книга рассчитана на специалистов в области континентального литогенеза, геологии россыпей, геоморфологии.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов «Книга — почтой» «Академкнига»:

480091 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97	630090 Новосибирск, 90, Академгородок, 22
370005 Баку, 5, ул. Джапаридзе, 13	620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137
734001 Душанбе, проспект Ленина, 95	700029 Ташкент, ул. Ленина, 73
252030 Киев, ул. Ленина, 42	450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 10
443002 Куйбышев, проспект Ленина, 2	720001 Фрунзе, бульвар, Дзержинского, 42
197110 Ленинград, П-110, Петрозаводская ул., 7	310003 Харьков, ул. Чернышевского, 87
117192 Москва В-192, Мичуринский проспект, 12	

3481

2p. 50c.