

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ
КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

Методические рекомендации

Ленинград

1981

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

Методические рекомендации

С. Савицкий
Григорьев
Лавинский
Сурганов
Богачев
Гусев
Борисов
Александров

автор (от имени коллектива)
Москва - 70 "Содружество"

Копировано
22/1-82.

ЛЕНИНГРАД

1981

Геохимические методы изучения кор выветривания.
Методические рекомендации. Л., 1981, с. 30. (М-во геологии СССР. Всесоюз. ордена Ленина научно-исслед. геол. ин-т).

Рекомендации посвящены геохимическим методам изучения: выделены ведущие геохимические характеристики, методы их получения и способы интерпретации при решении геохимических задач. Целью работы является оказание помощи широкому кругу геологов в содержательной обработке геохимических данных, полученных при геологической съемке, поисках и разведке элювиальных и близких к ним по генезису месторождений полезных ископаемых и при региональных исследованиях в районах развития кор выветривания.

Работа предназначена для системы повышения квалификации руководящих работников и специалистов организаций Министерства геологии СССР и представляет интерес для широкого круга геологов.

Табл. 5, ил. 1, список литературы — 36 назв.

Составитель: В.С.ПЕВЗНЕР

Научные редакторы:
А.С.КУМΠΑН, В.М.НЕМЦОВИЧ

Методические рекомендации рассмотрены и утверждены
Управлением региональной геологии
Министерства геологии СССР

ВВЕДЕНИЕ

Работы последних двух десятилетий существенным образом продвинули наши знания о корах выветривания. Доказано, что распространенность их определяется прежде всего периодичностью образования кор в истории Земли [22, 31]. Эта закономерность, прослеженная с раннего протерозоя и даже с архея, заключается в приуроченности кор выветривания к заключительным стадиям крупных геологических циклов. Со временем коры выветривания и их дериваты дают все более обширные ареалы, демонстрируя этим также увеличение частоты встречаемости кор [15].

Широкое распространение кор, специфические черты их геологии, минералогии и геохимии предопределили два обстоятельства. Во-первых, кора выветривания может рассматриваться как объект самостоятельных геологических исследований. Во-вторых, необходимость изучения этого объекта потребовала разработки и совершенствования специального комплекса геологических, минералогических и геохимических методов исследования. Кора выветривания — один из существенных источников рудного вещества различных месторождений полезных ископаемых. Именно поэтому геохимическое изучение этого геологического объекта приобретает в последние годы все более практический смысл.

Геохимическое изучение кор выветривания надо рассматривать как неотъемлемую часть комплекса геологических методов исследования. И, действительно, нередко лишь геохимические данные по разрезам метаморфического докембрия и осадочных образований платформенного чехла позволяют ответить на вопрос о наличии кор выветривания (или их дериватов) и степени их изменения. Так как в геологической истории коры выветривания представляют собой закономерное событие больших масштабов [10, 15, 22, 24, 25, 26, 28, 31], то сам факт присутствия коры дает нам надежный показатель для определения геологических (и стратиграфических) рубежей, для палеотектонических и палеоклиматических реконструкций.

1. КОМПЛЕКС ЛАБОРАТОРНЫХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЮВИАЛЬНЫХ ПОРОД

Элювиальные породы представляют собой полиминеральные образования. В их составе обычно преобладают тонкодисперсные минералы, для которых характерен широкий диапазон изоморфизма с заменой отдельных катионов и образованием закономерных сростаний слоев (смешаннослойные минералы) [7, 22]. Их точная диагностика требует проведения комплекса детальных лабораторных исследований. Желательно при этом использование проверенных, доступных и экспрессных методов, результаты которых могут быть легко интерпретируемы.

Основная задача лабораторных исследований — получение подробной минеральной, химической и физической характеристик элювиальных пород для детального расчленения и корреляции разрезов, выяснения возможного состава исходных пород, а также качественной и количественной оценки элювиальных пород как полезных ископаемых. Качественные и количественные определения состава изучаемых образований позволяют выяснить характер и направление геохимических изменений при корообразовании. Для решения этих задач используют следующие методы: 1) петрографический (изучение пород в шлифах); 2) гранулометрический и минералогический (изучение гранулометрии и минералов фракций); 3) термический; 4) рентгеноструктурный и рентгенографический; 5) электронографический; 6) спектральный анализ; 7) химический анализ; 8) изучение физических свойств исходных и элювиальных пород.

Некоторые из перечисленных методов (петрографический, термический и спектральный) массовые. Остальные применяются в основном для уточнения минерального состава, определенного массовыми аналитическими методами.

1. С помощью электронографии можно определить глинистые минералы в смесях (породах), начиная с 3%. Минимальное количество зависит от параметров элементарных ячеек минералов. Например: глиноземистый и железистый монтмориллониты легко отличимы при наличии 1—3% их содержания в породе, так как параметры их элементарных ячеек резко различны.

Электронная микроскопия позволяет обнаружить каолинит в количестве до 1%, монтмориллониты — при 3%, гидрослюды — с 1—5%.

2. Термический анализ довольно чувствительный метод и используется для определения как отдельных минералов, так и смесей. Он достоверно обнаруживает каолинит в смеси с монтмориллонитом. Уже при наличии 3—10% каолинита кривые нагревания монтмориллонита изменяются, а при 20%, по данным М.Ф.Викуловой, реакции каолинита становятся отчетливыми. Минимальное количество монтмориллонита, при котором определенно устанавливается его присутствие, по данным Г.Т.Волостных, составляет 20%. Глиноземистые и железистые монтмориллониты могут быть определены при 40—50% их в породах, каолинит с гидрослюдой проявляется с 20%, а гидрослюда определяется в смеси с каолинитом, начиная с 50%. При наличии в породах смешаннослойных минералов, а также хлоритов с монтмориллонитами и гидрослюдами результаты необходимо проверять рентгеновскими методами.

3. Рентгеновский анализ позволяет определять, по данным Ю.С.Дьяконова, каолиниты и монтмориллониты в породах, начиная с 1%, а гидрослюды — с 5% (последние при использовании ориентированных препаратов). Этот анализ позволяет проводить количественные определения глинистых минералов с точностью до 10% [19].

4. В эмиссионном спектральном анализе относительная погрешность обычно не меньше 40%, а в области порога чувствительности возрастает почти в два раза (по мнению Б.Я.Юфы, до 75%). Следует также помнить, что в элювиальных и многих исходных породах природная изменчивость содержаний некоторых элементов (например, молибдена) очень невелика. Для таких элементов эффективны лишь количественные методы определения их концентраций.

2. ПОЛЕВОЕ ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ

Этот вид работ входит составной частью в общее геологическое изучение территории. Обычные геологические маршруты и детальные описания отдельных наиболее полных (типоморфных) разрезов коры выветривания сопровождаются равномерным (по площади и разрезу в зависимости от масштаба работ) отбором штучных (~200 г) проб как из элювиальных, так и из исходных (неизмененных) пород. Количество проб определяется задачами исследования (например: геохимическое картирование потребует, несомненно, больше проб, чем изучение на той же площади опорных геохимических разрезов) и природной дисперсией распределения изучаемых химических элементов (например: коэффициенты вариации содержаний многих рудных элементов

резко возрастают при переходе от исходных к элювиальным породам). Кроме того, число проб связано с необходимостью выбора определенной системы обработки геохимической информации. Так, изучение баланса вещества и связанной с ним относительной подвижности элементов допускает использование единичных (представительных) проб, а применение статистических методов, естественно, ведет к увеличению числа проб.

В принципе количество проб для каждого изучаемого объекта (разреза, площади) может быть рассчитано по специальной формуле [11, 12, 29, 32], которая учитывает соотношение коэффициента вариации содержаний химического элемента (предположительно с наиболее неравномерным распределением) к заданному уровню погрешности определения среднего арифметического. Исходя из подобных соотношений, обычно для характеристики геологического объекта достаточно 30—35 проб. Следует помнить еще о двух моментах: случайности аналитических ошибок и устойчивости вычисляемых геохимических ассоциаций. Опыт показал, что для «сглаживания» этих помех, даже при самой малой природной дисперсии, необходимо не менее 15—20 проб. Во всяком случае при геологически грамотном, представительном отборе 35—50 проб дают полное представление о геохимическом облике объекта, например, о средних содержаниях элементов и их вариациях, геохимических ассоциациях и рядах подвижности.

Изменчивость содержаний химических элементов в элювиальных породах определяет природная гетерогенность, которая наиболее полно может быть отражена при обработке результатов простейшего штучного опробования [32] опорных геохимических разрезов.

3. ИЗУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

Изучение зональности и минерального состава кор выветривания тесно связано друг с другом. В основу изучения этих признаков положены методы петрографо-минералогические (см. раздел «Комплекс лабораторных методов изучения элювиальных пород») и геохимические. Методика основана на выделении в разрезах элювиальных образований зон с существенным преобладанием определенных минеральных разновидностей. Название зон принимается по преобладающему минеральному виду: каолининовая, гидрослюдистая, монтмориллонитовая и т.п. [6, 8, 19, 24, 26]. На основе изучения минеральной зональности выделяются профили, название которым принято давать по наиболее измененным продуктам (минеральным видам) выветривания. Профили (или формации), выделенные по признаку минеральной зональности, свидетельствуют об особенностях самого процесса выветривания и соответственно о возможностях и вероятных

способах концентрации определенных (в том числе рудных) химических элементов и образуемых ими геохимических ассоциаций.

При изучении зональности элювиальных пород, слагающих коры выветривания [6, 8, 10, 19], большую помощь может оказать знание типоморфных разрезов [22]. Ниже приведены типоморфные разрезы наиболее распространенных формаций кор выветривания.

Каолининовая (сиаллитовая) формация коры выветривания — одна из наиболее распространенных — известна на Украине, Урале, в Казахстане, Сибири, Приморье и других районах. С ней прямо или опосредованно связаны месторождения каолинов, природных пигментов, кварцевых (стекольных и формовочных) песков, а также концентрации минералов, содержащих тантал, ниобий, редкоземельные элементы и др. Снизу вверх разрез ее состоит из следующих зон: 1) щебнистая и дресвяная — малоизмененные породы; 2) гидрослюдистая (хлорито-гидрослюдистая) — глины зеленые с зернами кварца, реже полевого шпата, часто сохраняют текстуру исходных пород; 3) каолининовая (реже гетит-каолининовая) — глины каолининовые, светлые, иногда ожелезненные, с примесью корродированных зерен кварца, текстура исходных пород обычно не видна. Общая мощность разреза формации не превышает 60 м, в линейном морфологическом типе свыше 100 м.

Гиббситовая (аллитовая) формация коры выветривания широко распространена в палеогеновых и более молодых корах современных тропиков. Проявления ее известны в корах выветривания на Украинском щите, Урале, в Средней Азии и других районах СССР. С этой формацией связаны наиболее высококачественные и крупные месторождения бокситов, железных руд, а также повышенные содержания некоторых рассеянных элементов [7, 34]. Разрез (снизу вверх) представлен следующими зонами: 1) щебнистая — малоизмененные, часто пестроцветные породы; 2) гидрослюдисто-каолининовая — глины пестроцветные, текстура и структура исходных пород обычно видна; 3) каолининовая (гиббсит-каолининовая) — глины светлые, текстура исходных пород не всегда заметна; 4) гиббситовая (гетит-гиббситовая) — рыхлые и каменистые бокситы, перекрытые каменистыми образованиями гетит-гиббситовой и гетитовой кирасы. Мощность формации в целом не превышает 30—40 м.

Охристая (ферралитовая) формация коры выветривания распространена среди мезозойских и палеогеновых кор на ультраосновных и близких к ним по составу метаморфических породах и известна на Украине, Северном Кавказе, Урале, в Казахстане и других районах. С данной формацией связаны месторождения силикатного никеля и кобальта, скопления магнетита, хризопраза и охр [7, 16, 19]. В составе формации выделяются (снизу вверх) следующие зоны: 1) щебнистая — малоизмененные породы, иног-

да с магнезитом; 2) керолит — карбонатно-хлоритовая (хлоритовая) — рыхлые зеленые, нередко пестроцветные породы с заметной текстурой исходных пород; 3) нонтронитовая — глины зеленые, восковидные, оскольчатые, текстура исходных пород не всегда видна; 4) гетитовая — охры рыхлые, реже сцементированные опалом и гидрогетитом, текстура исходных пород практически не видна.

Кремнистая (силицитовая) формация коры выветривания распространена ограниченно на приподнятых останцах пенепленов среди меловых и палеогеновых кор на кремнистых и карбонатных породах. С этой формацией связаны месторождения маршаллита [7, 36]. Для нее характерен разрез, представленный (снизу вверх) следующими зонами: 1) щебнистая; 2) кавернозная — выщелочная, ноздреватая, с примесью гидрослюд; 3) маршаллитовая — рыхлая муцистая, каолинито-кремнистая порода. Мощность формации обычно не превышает 40 м.

4. ОСНОВНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И МЕТОДЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Выяснение закономерностей распределения и поведения химических элементов в коре выветривания, кроме качества геологического описания и отбора проб, их анализа, во многом зависит от методов обработки исходных аналитических данных. Поэтому целесообразен оптимальный комплексный подход к использованию сведений о содержании химических элементов в коре выветривания и исходных образованиях. Сведения о самих элементах, используемые достаточно широко для выявления сходства и различий геологических образований, прогнозной оценки элювиальных и исходных пород, представляют собой лишь один из аспектов геохимического изучения. Этот аспект можно определить как «элементное направление» геохимических исследований. Другой аспект — структурное геохимическое направление — связан с использованием геохимических ассоциаций [3, 4, 23]. Не конкурируя и не подменяя друг друга, оба направления дают возможность получения наиболее полной, достоверной и аргументированной информации для содержательной геологической (в том числе металлогенической) интерпретации. В соответствии с этим необходимо изучение количественных оценок основных геохимических параметров: концентраций химических элементов (и их дисперсий, коэффициентов вариаций), меры связи между ними в ассоциациях и относительной подвижности, а также баланса вещества этих элементов.

Существует много методических приемов обработки геохимической информации, основанных на использовании математической статистики [12, 17, 32], которые несколько лет тому назад были суммированы в единую систему [23]. Эффективность пред-

ложенной системы обработки проверена на десятках геологических объектов [22, 23].

4.1. Средние и дисперсии. Сопоставимость результатов

Обычные статистические параметры (средние и дисперсии) в общем являются традиционными. Сходство или различие любых объектов решается прежде всего при просмотре этих показателей. Вариации их содержаний (дисперсия, коэффициент вариации) дают возможность судить о равномерности распределения элементов в исходных и элювиальных образованиях. Геохимическая специализация элювиальных пород (и формаций) определяется как аномальными содержаниями рудных элементов, так и резкой дифференцированностью их распределения.

4.1.1. Геохимическое поле пород, претерпевших выветривание (равно как и эпигенез), обычно отличается более резкая дифференцированность распределения элементов и соответственно четкая моноэлементная зональность. Некоторые халькофильные элементы с переменной валентностью (например, Cu, Sb, Mo) образуют в корях выветривания вторичные ореолы, нередко плохо увязываемые с исходными породами. Изучение их следует проводить с помощью анализа ассоциаций (структурного геохимического анализа) и геохимических рубежей. Иногда результаты поэлементного и структурного изучения совпадают. Так, высокие концентрации свинца и цинка нередко обнаруживают в корях выветривания, где эти элементы постоянно связаны высокой положительной корреляционной зависимостью.

4.1.2. Соотношение среднего значения и дисперсии в общем виде отражает равномерность распределения содержаний элемента в системе. Вполне естественно, что вблизи зон концентрации низкокларковых элементов неравномерность всегда будет возрастать. Также резкое повышение коэффициентов вариации содержаний химических элементов (соответственно и неравномерности их распределения) происходит на границе элювиальных пород с исходными (неизменными) образованиями.

Для проверки расхождений между дисперсиями можно использовать, например, критерий Фишера. Эта проверка имеет смысл, так как соотношение выборочного среднего и дисперсии служит оценкой равномерности распределения химических элементов в рассматриваемых системах. Если полученные значения критерия Фишера меньше или равны табличным, то можно признать, что существенных расхождений между дисперсиями (вероятно, и характером распределения элементов в системе и между системами) нет. В таком случае сходимость результатов (и их сравнимость) следует признать вполне удовлетворительной.

В табл. 1 приведены результаты проверки опробованного и геохимически обработанного разреза аллитной элювиальной формации (Западная Гвинея). Эти результаты показывают, что по сравнению с исходными породами менее удовлетворительные данные получаются по статистикам гидрослюдисто-каолинитовой зоны. Статистики по остальным зонам можно принять как вполне

Таблица 1

Проверка сопоставимости средних квадратических отклонений по критерию Фишера (вероятность 95%)

Зоны коры выветривания	Ti	V	Cr	Cu	Ni	Pb	Bc	Ba
Шлейфовая кираса	+	-	+	+	+	+	+	+
Бовальная кираса	+	+	+	+	+	+	+	+
Гиббетовая каменистая	+	+	+	+	+	-	+	-
Гиббетовая рыхлая	+	+	+	+	+	-	+	-
Каолинитовая	+	+	+	+	+	+	+	+
Гидрослюдисто-каолинитовая	-	-	-	+	+	-	-	-

Примечание. Плюс — удовлетворительные; минус — неудовлетворительные данные.

сопоставимые (сравнимые). Следует также подчеркнуть, что связи между концентрациями всех химических элементов в породах гидрослюдисто-каолинитовой зоны очень слабые, а относительные концентрации некоторых элементов (например, Pb) не согласуются с их положением в ассоциациях. Вероятно, это вызвано сильным перераспределением элементов внутри системы в результате полного распада исходных образований. Подобный случай уже был рассмотрен на примере марганца [7].

4.1.3. Характер распределения элементов (и сопоставимость результатов) позволяет выделять в разрезе неповторяющиеся геохимические зоны. Обратим внимание еще на одну деталь: породы с наименее сопоставимыми статистиками (гидрослюдисто-каолинитовая зона) совпадают с зоной полного перераспределения элементов и перестройкой всей системы; именно по этой причине к верхней ее границе, совпадающей с каолинитовым элювиальным горизонтом, приурочен основной геохимический рубеж данного профиля выветривания [22].

4.1.4. Из многих средних характеристик (среднее арифметическое, геометрическое и др.) удобнее пользоваться медианой. Медиана обычно менее подвержена влиянию систематических ошибок и более устойчива в выборках с высоким эксцессом. Подобные выборки могут быть, например, при наличии очень больших перепадов в содержаниях химических элементов (в разрезе, на площади, внутри одного горизонта), когда за сред-

нее (фоновое) содержание принимают медиану (Me). Последняя делит общий вариационный ряд на две равные (по числу членов) части. При четном числе проб медиана совпадает со средним арифметическим значением выборки. Вычисляют ее по следующей формуле:

$$M_e = \frac{c \cdot \sum m_i S_n}{m_{Me}}, \quad (1)$$

где c — длина интервала; m_i — частота; S_n — сумма частот интервалов от самого нижнего до медианного (но без последнего); m_{Me} — частота медианного интервала.

Значением медианы можно пользоваться при суммировании результатов приближенного спектрального анализа: для сравнительной оценки поведения, при вычислении относительных концентраций и кларков концентраций химических элементов и других расчетах.

4.2. Коэффициенты корреляции

Обычный парный коэффициент корреляции дает представление о линейных связях между химическими элементами. Он меняет значения от +1 до -1: при одновременном возрастании (или уменьшении) концентраций химических элементов они образуют положительные, а при отсутствии подобной согласованности (например, при увеличении содержания одного элемента другой уменьшает эту же характеристику) — отрицательные корреляционные связи. Коэффициент корреляции представляет собой меру статистической связи между содержаниями двух или более химических элементов. Непосредственное использование этой характеристики позволяет решать различные в научном и практическом отношении задачи. Ю.К.Бурковым, например, были изучены соотношения меди и ртути на южном закрытом элювием и делювием крыле одного из месторождений киновари, позволившие заметно расширить перспективы месторождения. Дело в том, что концентрации ртути резко снижаются над залежью при наличии «экрана» из элювия и делювия, превышающего 3 м. Но при этом сохраняется значение коэффициента корреляции между медью и ртутью около 1. Дальнейшая обработка Ю.К.Бурковым этого материала показала, что медь в таких зонах входит в состав единой ассоциации с никелем и марганцем, но не со ртутью, сурьмой, мышьяком [23].

4.2.1. Значения коэффициента корреляции между концентрациями ведущих химических элементов в непосредственно связанных с корами выветривания бокситах Тимана позволяют решать региональные геохимические задачи. Для примера рассмотрим данные химических анализов породообразующих эле-

ментов (Al, Si, Ti, Fe и п.п.) из месторождений Южного и Среднего Тимана (материалы А.И.Ямпольского, обработанные во ВСЕГЕИ на БЭСМ-4). Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 2 и 3 в виде корреляционных матриц. По приведенным коэффициентам корреляции можно изученные элементы сгруппировать следующим образом:

- 1) Южный Тиман — (Al—Ti) → Fe → п.п. → Si;
- 2) Средний Тиман — (Al—Ti) → п.п. → Fe, Si.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между содержаниями породообразующих элементов в бокситах Второго Кольского месторождения (Южный Тиман; 258 проб)

Элементы	Al	Si	Fe	Ti	П.п.п.
П.п.п.	+0,26	-0,42	-0,10	+0,17	
Ti	+0,80	-0,72	+0,25		
Fe	+0,20	-0,56			
Si	-0,84				
Al					

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между содержаниями породообразующих элементов в бокситах Верхневарькинского месторождения (Средний Тиман, 282 пробы)

Элементы	Al	Si	Fe	Ti	П.п.п.
П.п.п.	+0,21	+0,18	-0,60	+0,10	
Ti	+0,75	-0,53	-0,44		
Fe	-0,62	+0,23			
Si	-0,56				
Al					

В приведенных рядах высокой положительной корреляцией связаны Al и Ti и постоянным антагонистом их является Si; промежуточное положение занимают Fe и п.п.п. По существу, это ассоциации ведущих химических элементов: в бокситах Южного Тимана к инертному «ядру» Al—Ti примыкает Fe, а в бокситах Среднего Тимана — п.п.п. Таким образом, южнотиманские бокситы явно ассоциируют с железом, а для среднетиманских можно отметить наличие среди подвижных компонентов ассоциации Fe—Si. Если учесть, что в южнотиманских бокситах железо обычно обнаруживает тенденцию к неравномерности распределения, то следует признать реальным существование на Тимане среди бокситов (и вмещающих их пород) двух геохимических зон: среднетиманской алюминиевой и южнотиманской

железо-алюминиевой. Естественно, что для поисков высококачественных бокситов следует при таком подходе отдать предпочтение Среднему Тиману.

Приведенный выше пример показал, что использование коэффициента корреляции позволяет наметить основные геохимические ассоциации и ряды подвижности. Кроме того, Б.А.Богатыревым были продемонстрированы возможности этого параметра для выявления наложенных процессов. Так, отрицательная корреляционная связь в бокситах между содержанием CaO и других компонентов наблюдается при карбонатизации, а значимую отрицательную корреляцию концентраций Fe₂O₃ и CaO в южноуральских серых бокситах Б.А.Богатырев с соавторами [1] объясняет как результат одновременности процессов пиритизации и карбонатизации.

4.3. Геохимические ассоциации

По Р.Миллеру и Дж.Кану [17], ассоциацией называют такую совокупность случайных величин, в которой корреляционная зависимость между всеми парами принадлежащих ей переменных равна или выше некоторого произвольно заданного уровня. В принципе это определение верно.

Значение ассоциаций, основу изучения которых заложили В.И.Вернадский, В.М.Гольдшмидт и А.Е.Ферсман, признано всеми [29, 35]: они относятся к ведущим геохимическим характеристикам. Ассоциации химических элементов нашли широкое применение в металлогенетических исследованиях и при интерпретации геологических процессов. Выделяя их, в общем, подразумевают сонахождения (парагенезы) химических элементов. Это понимание следует уточнить и сделать более пригодным для практического использования, так как принцип «сонахождения» противоречит закону всемирного рассеяния (всюдности) Кларка—Вернадского. Практически геохимическая ассоциация представляет собой группу элементов, содержания которых в исследуемом геологическом объекте распределены согласованно (т.е. совместно снижают или повышают свои концентрации). Подобное определение ассоциации, предложенное Ю.К.Бурковым [3], способствует выбору методов для их рационального выделения и изучения.

Доказано [3, 4, 23], что непосредственное использование корреляционного анализа для выявления геохимических ассоциаций обычно недостаточно обоснованно. Известно много примеров, когда пара элементов с коэффициентом корреляции около -1 входит в состав одного минерала, руды и т.п. Это наиболее характерно для изоморфных элементов. Недостатки метода их выделения видны в ассоциациях ведущих химических элементов

из тиманских бокситов (см. предыдущий раздел): элементы, скоррелированные отрицательно, попадают там в одну ассоциацию. Поэтому обоснованная оценка геохимических ассоциаций возможна при учете как корреляций между содержаниями самих элементов, так и взаимоотношений каждой пары химических элементов со всеми остальными.

В настоящее время для выделения геохимических ассоциаций при изучении элювиальных и исходных образований успешно используются два метода: 1) метод многократной корреляции, разработанный во ВСЕГЕИ Ю.К.Бурковым [3, 23], 2) факторный анализ [14, 17].

4.4. Многократная корреляция

Необходимость применения этого метода вызвана тем, что обычный корреляционный анализ при выделении геохимических ассоциаций нередко дает неудовлетворительные результаты. Взаимоотношения каждой пары химических элементов со всеми остальными можно оценить количественно путем корреляции двух переменных величин, представляющих собой простые коэффициенты корреляции каждого из двух элементов со всеми остальными. Так определяют коэффициенты корреляции второго порядка. Скоррелировав аналогичным образом последние, получим коэффициент корреляции третьего порядка, затем четвертого и т.д. Каждый последующий этап многократной корреляции дает статистические оценки, отражающие все более высокие уровни взаимоотношения между рассматриваемыми элементами. В результате весь выбранный набор химических элементов, пройдя процедуру своеобразного корреляционного усреднения, распадается на две ассоциации. Таким образом, этот метод позволяет добиться максимального синтеза исходной информации.

На основании данных многократной корреляции составляют матрицы порядков коэффициентов корреляции между содержаниями химических компонентов, где показано, в каком цикле коэффициент корреляции достигает значений $\pm 0,9$ и более [7].

4.5. Метод главных компонент факторного анализа

Этот вид статистической обработки используют для замены многочисленных наблюдаемых признаков меньшим числом переменных без существенной потери информации [14, 17]. Метод был предложен Хоттelingом. Существо метода заключается в переходе от исходной системы переменных (в нашем случае это концентрации химических элементов) к линейным группировкам тех же данных. Операции ведутся с корреляционной (ковариационной) матрицей, внутренняя структура которой используется

для перехода к новым переменным (компонентам). Комбинации независимы друг от друга и вносят различный вклад в общую дисперсию системы. Геометрически все эти действия выглядят как переход к новой ортогональной системе координат. Поэтому без существенной потери можно оценивать лишь ведущие факторы: чем меньше вес компоненты, тем больше погрешностей допущено при ее вычислении.

При помощи факторного анализа, так же как и многократной корреляции, можно получать и изучать линейные геохимические ассоциации (диаграммы ассоциаций), а при сочетании с методами тренд-анализа и скользящего окна исследовать их изменчивость по площади. Разработаны соответствующие программы для получения на ЭВМ факторных диаграмм и пространственных трендов различных компонент.

Следует помнить, что на факторных диаграммах очень четкие отличия наблюдаются между породами разных элювиальных зон, но менее четко различимы элювиальные формации. Вероятно, это объясняется наличием в каждой компоненте антагонистических групп химических элементов и тем, что факторные нагрузки сами по себе различные. Поэтому использовать этот метод для сравнения территориально и по возрасту отдаленных объектов практически сложно. Значительно целесообразнее использовать метод главных компонент факторного анализа при крупномасштабных и более детальных работах.

4.5.1. Есть и общие ограничения у рассмотренных методов выделения геохимических ассоциаций. К ним следует в первую очередь отнести число сравниваемых признаков (набор химических элементов) и количество проб в сравниваемых выборках. Естественно, что признаковое пространство всегда должно совпадать, т.е. необходимо выбрать для изучения стандартный набор химических элементов. Такой набор должен состоять из представителей всех геохимических групп, что необходимо для последующей содержательной геологической интерпретации. Вот примерный список элементов, включающий при пользовании любой классификацией представителей всех геохимических типов: Be, Al, Ti, Ga, Zr, Sc, Sr, Rb, Y, Ba, Sn, Pb, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Nb, Mo, Ag, W, Au.

Также естественно, что нельзя сравнивать объекты с 10 и 100 пробами. Во всяком случае, выборка тогда дает устойчивые геохимические ассоциации, когда включает более 15—20 проб.

4.6. Ряды подвижности. Баланс вещества

Поведение химических элементов при корообразовании и прежде всего их подвижность оцениваются при выявлении различных геохимических свойств объектов: суммарной подвижности, которая вычисляется с помощью стохастической модели, и отно-

сительной подвижности, сложившейся между новообразованной системой (элювий) и средой [22]. Относительная геохимическая подвижность вычисляется разными способами. До сих пор наиболее распространен изообъемный метод сравнения, известный в литературе под названием метода абсолютных масс [13, 18, 33]. Возможность использования результатов подобного сравнения для геологической интерпретации уже не раз ставилась под сомнение [7, 9, 22]. В.К.Головенко [9] показал непригодность этого метода для изучения уплотненных и метаморфизованных докембрийских кор выветривания, в которых наиболее надежные результаты дают расчеты по наименее подвижному химическому элементу, так называемому элементу-свидетелю.

Корообразование сопровождается постоянной убылью вещества, однако то, что «убывает» из коры, может быть «найден» в реках, озерах, морях, осадках (это, вероятно, одна из нагляднейших иллюстраций практического использования закона сохранения). Таким образом, с геохимических позиций кору выветривания следует рассматривать как часть экзогенной системы, т.е. кора выветривания (если ее оценивать отдельно от других экзогенных образований) — неравновесная система. Следовательно, изообъемными методами сравнения при ее изучении пользоваться следует с величайшей осторожностью и, вероятно, в очень редких случаях.

4.6.1. В зависимости от имеющихся в наличии данных относительную геохимическую подвижность удобно определять по следующим формулам:

$$K_i = \frac{d_0 P_0^i}{d_0 P_0^i + 0,1 \Delta p_i}, \quad (2)$$

$$K_i = \frac{C_k P_0^i}{C_0 P_k^i}, \quad (3)$$

где K_i — относительная геохимическая подвижность окисла (элемента) i ; d_0 — объемный вес исходных пород, г/см³, Δp_i — принос (вынос) вещества; грамм на 1000 см³ исходной породы; C_0 , C_k — содержание относительно стабильного окисла в исходных (C_0) и элювиальных (C_k) породах, вес. %; P_0^i , P_k^i — содержание искомого окисла (элемента) i в исходных и элювиальных породах, вес. %.

Оценку K_i удобно производить по специальной классификационной шкале (табл. 4) [22].

В формуле (2) при расчете K_i использована величина приноса (выноса) вещества для конкретного химического элемента i . Сумма этих величин для всех изучаемых элементов с соответственным знаком (+, —) представляет собой оценку баланса вещества. Для подсчета баланса вещества удобно использовать формулу [9, 27]:

$$\Delta P_i = 10 d_0 \left(\frac{C_0}{C_k} P_k^i - P_0^i \right). \quad (4)$$

Как видно, эта формула позволяет производить расчет баланса вещества при изменении геологического объема по данным о содержании устойчивого химического элемента.

Таблица 4

Шкала относительной геохимической подвижности окислов (элементов) в корах выветривания

Тип подвижности	Группа подвижности	K_i [18, 22]
Рассеяния	I. Сверхподвижных	> 15
	II. Высокой подвижности	15—5
	III. Подвижных	5—1,5
Стабильный	IV. Слабо подвижных	1,5—1,1
	V. Стабильных	1,1—0,9
	VI. Слабой концентрации	0,9—0,75
Концентрации	VII. Концентрации	0,75—0,5
	VIII. Высокой концентрации	0,5—0,2
	IX. Сверхконцентрации	< 0,2

4.6.2. Применение стохастической модели для определения суммарной (общей) подвижности основано на многообразии форм миграции химических элементов в зоне гипергенеза. Положение любого химического элемента в ряду подвижности определяет соотношение частей его массы, мигрирующей в форме растворенной и в виде взвеси. Ряд миграции отражает влияние двух факторов: во-первых, физико-химических свойств элементов и их мигрирующих соединений, во-вторых, их способность переноситься в поверхностных условиях. В реальных условиях соседние элементы должны, следовательно, обладать наибольшей общностью свойств в конкретной обстановке. Поэтому совершенно справедлив вывод о том, что степень согласованности колебаний содержаний будет всегда выше для пары химических элементов — соседей в ряду подвижности, по сравнению с элементами, удаленными в ряду подвижности друг от друга [3]. Практически элементы в ряду располагаются так, что коэффициенты корреляции между содержаниями соседних элементов должны обладать наиболее высокими положительными величинами.

Учитывая изложенное выше, определение рядов геохимической подвижности в элювиальных образованиях можно производить одновременно с расчетом геохимических ассоциаций. Для этого надо учесть не только силу положительной корреляционной связи между элементами внутри ассоциаций, но и степень их антагонизма по отношению к элементам противоположной ассоциации. Тогда группировка элементов в одну ассоциацию с титаном (в докембрийских корах чаще используют алю-

миний) дает нам группу элементов, инертных при корообразовании, а в антагонистической ассоциации будут представлены наиболее подвижные химические элементы.

4.6.3. Стохастическая модель практически реализуется в геохимических ассоциациях, которые можно рассматривать как показатель упорядоченности и равновесности геохимических систем. Геохимическая упорядоченность проявлена в закономерном чередовании в ассоциациях групп элементов с различными (полярными) геохимическими свойствами. Геохимическая равновесность — функция равновесия, сложившегося между изучаемой системой (ее упорядоченностью) и средой. Топологически она представлена, с одной стороны, элементами симметрии подобия среды и объекта, с другой (как выражение принципа полярности) — элементами инверсионной симметрии и антисимметрии. Геохимическую структуру (упорядоченность и равновесность) мы проиллюстрируем на некоторых примерах.

Пример 1. Каолинитовая элювиальная формация [22, 23]: $((\text{Ti}, \text{Al}, \text{P}, \text{Zr})\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ga}, \text{Sn}) \longrightarrow ((\text{Ni}, \text{Co})\text{Cu}, \text{Mg}, \text{Be}, \text{Ba}, \text{Sr} (\text{Ca}, \text{Si}, \text{K}, \text{Na}))$.

Типичная геохимически равновесная и упорядоченная экзогенная система. Характерное чередование групп химических элементов с фельсифильными (P, Sn или же Ba, Sr и т.п.) и фемафильными (Mn, Fe, Cr и др.) свойствами, которые разделяют гомеофилы (Ti, Al, Zr, Ga, Be). Справа налево отмечается общее увеличение подвижности элементов-фельсифилов, свойственное в целом близповерхностной обстановке.

Пример 2. Охристая элювиальная формация [22, 23]: $(\text{Zn}(\text{Zr}, \text{Ti}) \text{Mn}, \text{Ga} (\text{P}, \text{Sr}) \text{Al}) \longrightarrow \text{Sc}, \text{Ge}, \text{K}, \text{Be} ((\text{Ni}, \text{Co}) \text{V}, \text{Cr}, (\text{Si}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{Ba}, \text{Cu}, \text{Mg}))$.

Геохимически неравновесная и неупорядоченная система: явный сдвиг в сторону фемафильности, но это — кора выветривания, и влияние эндогенного фактора здесь исключено.

Пример 3. Гиббситовая элювиальная формация [22, 23]: $((\text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Zr}, \text{Al}) \text{Sc}, \text{P}, \text{Ca}, \text{Mo}, \text{Be}, \text{Ga}, \text{Zn}, \text{Mn}) \longrightarrow (\text{Ge}, \text{Sn} (\text{Pb}, \text{Ba}, \text{Mg}, \text{Na}, \text{Si}, \text{K}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{As}, \text{Cu}, \text{Sr}))$.

Геохимически неупорядоченная система: все гомеофилы сместились в правую часть, а в левой — представители групп фельсифилов и фемафилов.

Приведенные выше геохимические ассоциации характеризуют и ряды подвижности наиболее распространенных элювиальных формаций. Общим для них является то, что все инертные при корообразовании элементы сгруппированы в левой ассоциации — Ti, Al, Zr, Ga и др. (ассоциации отделены друг от друга стрелкой, которая одновременно показывает усиление подвижности в ряду рассматриваемых элементов). На основе подобного распределения элементов левую ассоциацию в формациях кор выветривания можно назвать гомеофильной (или литофильной),

а правую, где присутствуют наиболее подвижные химические элементы, фема-фельсифильной (или сидеро-халькофильной) ассоциацией.

4.7. Кларки концентраций и относительные концентрации

Для сравнительной оценки поведения химических элементов и приведения их к единому уровню отсчета используют отношения содержаний химических элементов к их кларкам (кларки концентрации), а также к средним содержаниям в определенных типах пород или к исходным породам (относительные концентрации). Подобные характеристики показывают тенденцию отдельных элементов и образуемых ими ассоциаций к концентрации (рассеянию) как в элювиальных формациях, так и в конкретных элювиальных горизонтах [7].

Ряды, построенные на основе изучения относительных концентраций, иногда необоснованно сравнивают с рядами подвижности. Примером подобного сравнения может служить ряд «подвижности» в каолинитовом горизонте коры выветривания по глинистым сланцам, заимствованный из [20]: $[\text{Co}, \text{Be}, \text{Fe}^{2+} \longrightarrow \text{Ni}, \text{V}, \text{F}, \text{Cr}] \longrightarrow [\text{Ti}, \text{Si}, \text{Sr}, \text{Li}, \text{Ga}, \text{Rb}, \text{Zn}, \text{Cu}, \text{Sn}, \text{Al}, \text{Ba}] \longrightarrow [\text{Pb}, \text{B}, \text{Fe}^{3+} \longrightarrow \text{Sc}, \text{Zr}]$. Здесь нами выделены три группы элементов, которые условно назовем группами: кобальта (концентрации), титана (стабильная) и свинца (рассеяния). Комментировать этот ряд подробно нет смысла, так как несоответствие относительных концентраций положению элементов в ряду подвижности сразу бросается в глаза. Аномальное положение в этом ряду железа, фтора, кремния, стронция, лития, рубидия, бария и циркония, т.е. девяти элементов, совершенно очевидно. Но несмотря на приведенные недостатки, этот ряд свидетельствует об общих геохимических тенденциях к рассеянию и концентрации по сравнению в данном случае с исходными породами.

Значительно ближе к рядам подвижности и геохимическим ассоциациям ряды, построенные по кларкам концентраций. Для расчета приведенных в табл. 5 рядов средние содержания элементов в бокситах взяты по В.А.Тенякову [34], а в глинах и глинистых сланцах, показанных для сравнения, — по В.А.Виноградову [5]. По существу, кларки концентраций в наглядной форме дают возможность выделить три основных геохимических типа: концентрации, стабильный и рассеяния. Кроме того, обращает на себя внимание скопление большинства химических элементов в типе концентрации у бокситов и в стабильном у глин. У последних, например, такое распределение вполне объяснимо более полной гомогенизацией вещества в процессе образования пород. Правда, следует учесть то, что подобное изучение не учитывает характер изменения объема пород при корообразовании. Поэтому, измеряя распространенность химических элемен-

Таблица 5

Распространенность химических элементов в различных бокситах
(составил В.С.Певзнер по данным А.П.Виноградова [5] и В.А.Тенякова [34])

Горные породы		Ряды элементов с кларками концентраций		
		>2	2—0,9	<0,9
Бокситы формаций	Аллитной Элювиальной	Ti, V, Sc, Zr, U, Th, Al, Fe, Cr, Ga, Ge →	Pb, B, Cu, Zn, Co →	Sn, Au, Be, Ni, Sr, Ba, Cl, Li, Si
	Терригенных	Sc, V, Zr, Ti, B, Al, Fe, Ge, Cr, U, Ga, Th, Li, Pb →	Zn, Co, Cu, Au →	Sn, Be, Ni, Sr, Ba, Cl, Si
	Карбонатных	Sc, Pb, B, U, Zr, Li, Al, Fe, Ti, Th, Ge, Ga, V, Be →	Sn, Co, Cr, Cu, Ni →	Zn, Au, Sr, Ba, Cl, Si
Глины и глинистые сланцы		B, Sn →	Li, Ga, Ni, Ge, V, U, Sr, Pb, Al, Zr, Cu, Ba, Co, Ti, Sc, Zn, Cl →	Th, Si, Be, Fe, Au
Геохимический тип		Концентрации	Стабильный	Рассеяния

гов кларками концентраций и относительными концентрациями, мы получаем возможность изучать не поведение элементов в процессе, а современное состояние, сложившееся между корой выветривания и литосферой в целом. Такие оценки, бесспорно, полезны для познания возможной геохимической (и металлогенической) специализации элювиальных и близких к ним осадочных образований.

4.8. «Скользящее окно». Тренд-анализ

Любая из рассмотренных выше геохимических характеристик (средние, дисперсии, мера связи, ассоциации и подвижность) может быть оценена в плане и разрезе с помощью методов «скользящего окна» и тренд-анализа [17, 22, 23].

4.8.1. Метод «скользящего окна» заключается в том, что в одном из углов изучаемой поверхности (или разреза) берется участок с представительным числом проб. Результаты анализов этих проб обрабатываются по соответствующей программе. Получаются необходимые для решения параметры (средние, дисперсии, ассоциации и т.п.), которые наносят на карту (разрез) в центре выбранного участка. Затем вместо одной пробы (или группы проб) добавляется новая проба (или группа проб) и т.д. Подобная процедура повторяется до тех пор, пока карта (раз-

рез) не «пройдена» целиком «скользящим окном». Затем точки с равными значениями изучаемого параметра соединяются между собой. Таким способом могут быть получены карты различных изопараметров.

4.8.2. Смысл тренд-анализа состоит в определении общего характера (тенденции) изменения исследуемого параметра на площади [22, 24]. Карта трендовой поверхности отображает эти изменения. Отличие тренд-анализа от картирования состоит в том, что в последнем отклонения от исследуемой поверхности в каждой точке должны быть минимальными. Между этими видами обобщения существует непрерывный переход, помогающий детальнее раскрыть как региональные, так и локальные особенности распределения параметра.

В применяемом во ВСЕГЕИ варианте тренд-анализа (разработан В.И.Мишиным на основе использования большого класса непрерывных функций) для определения различных ступеней перехода от тренд-анализа к картированию введено такое понятие, как достоверность. Последняя в нашем случае означает степень согласия выбранного регрессионного уравнения (выбранной поверхности) с результатами эксперимента, т.е. с данными опробования. Чем выше достоверность, тем все более общую тенденцию изменения какого-либо параметра мы наблюдаем. При уменьшении достоверности выявляются локальные особенности его распределения [22].

На практике используют разные модели тренд-анализа. Наиболее популярен полиномиальный вариант, основанный на рядах Фурье. В этом варианте неизбежны серьезные искажения под влиянием «остатков» (отклонений) от трендовой поверхности, которые к тому же зависят непосредственно от уравнения тренда.

4.8.3. Наиболее перспективным представляется сочетание методов «скользящего окна» и тренд-анализа с многократной корреляцией или методом главных компонент факторного анализа, позволяющее картировать геохимические ассоциации. Подобный подход помогает отличать, например, аномальные содержания химических элементов, связанные с рудными концентрациями, от повышенных фоновых их содержаний, находить геохимические рубежи и зоны эпигенетически измененных элювиальных пород.

4.9. Индикаторные отношения

Отношения различных химических элементов широко используют при геологической интерпретации геохимической информации. Так, по данным В.К.Головенка [9], удивительным постоянством в метаморфических докембрийских породах выветривания отличается отношение двуокиси титана к глинозему (титановый модуль), дающее возможность судить об элювиальном

(непереотложенном) характере продуктов выветривания. Упорядоченно ведет себя в разрезах кор выветривания кремневого модуль (отношение глинозема к кремнезему): как правило, этот показатель растет вверх по разрезу. Также закономерно вверх по разрезам различных кор выветривания уменьшается отношение суммы окислов щелочных и щелочноземельных элементов к глинозему.

Используемые индикаторные отношения свидетельствуют о глубине самого процесса выветривания и некоторых возможных эпигенетических преобразованиях.

4.9.1. Сюда же могут быть отнесены колебания относительных геохимических подвижностей кремнезема и глинозема. Эти соотношения были специально исследованы В.С.Певзнером в 1969 г. Известно, что в разрезах охристой, каолинитовой и других элювиальных формаций высокой подвижностью обладает кремнезем. Глинозем, наоборот, более или менее инертен и редко выносится за пределы системы. Учитывая согласованность колебаний их относительных подвижностей, можно ожидать значительной концентрации глинозема в любом профиле и по любым исходным породам. Иными словами, изучение этого нестандартного индикаторного отношения свидетельствует об отсутствии «запрещенных» пород для образования концентраций глинозема.

4.9.2. Поведение пары кремнезем—глинозем — хороший показатель глубины распада алюмосиликатных пород при корообразовании. Учитывая изложенное выше, за количественную меру оценки распада пород при корообразовании можно принять не отношение подвижностей, а более простую для расчета величину — разность показателей относительных подвижностей кремнезема и глинозема. Естественно, что с увеличением разности относительных подвижностей рассматриваемых компонентов растет податливость исходных пород процессам выветривания.

Таким образом, может быть выявлен ряд устойчивости горных пород выветриванию в конкретных разрезах. Вероятно, последнее положение может найти применение в инженерно-геологических исследованиях.

5. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.

МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Геохимическое изучение кор выветривания предполагает решение четырех основных типов задач, для которых характерны свои методы решения и геологической интерпретации:

- 1) выяснение характера распределения и поведения химических компонентов (окислов, элементов);
- 2) определение основных геохимических рубежей;
- 3) изучение степени связи осадочных толщ с корами выветривания.

4) определение геохимической специализации кор выветривания.

Теоретическая основа постановки задач и использования конкретных методов опирается на основные природные законы: закон сохранения, фундаментальный принцип отражения (и основанные на нем законы симметрии), закон акселерации. Так, при решении задач первого типа (об этом уже говорилось) должен соблюдаться закон сохранения. При решении задач второго—четвертого типов используются законы симметрии и некоторые аспекты закона акселерации. Эти же законы находят применение в структурно-геохимическом анализе (например, при интерпретации геохимических ассоциаций).

5.1. Выяснение характера распределения и поведения химических компонентов

Задачи этой группы решают с использованием обычных методов сравнения [12, 22, 27, 29, 32] — изучаются средние и дисперсии, кларки концентрации, баланс вещества, геохимические ассоциации и подвижность химических элементов. О самих методах было сказано выше. Так, оценку подвижности удобно проводить по специальной классификационной шкале (см. табл.4). Смысл этой оценки в том, что каждому типу подвижности соответствуют свои количественные значения. Естественно, что для геологического прогноза месторождений полезных ископаемых наиболее интересны те элементы (и ассоциации), которые по показателям своих подвижностей (K_i) попадут в типы концентрации и стабильный. Если второй тип (стабильный) может оказаться полезным в основном при оценке высококларковых химических элементов (например, россыпей или месторождений бокситов, железных и марганцевых руд), то тип концентрации, отражающий общую тенденцию элементов к перераспределению внутри системы, несет информацию о стремлении к накоплению любых химических элементов.

Сравнение относительной геохимической подвижности с положением элементов в ассоциациях указывает на сильную подвижность одних и инертность других. Это сравнение оказалось особенно перспективным при прогнозной оценке территории на полигенные и экзогенные полезные ископаемые. Например, совпадение низких значений второго типа подвижности (т.е. относительной геохимической подвижности) и положения химического элемента в правой ассоциации совместно с ведущими геофилами (литофилами) позволяет весьма оптимистично оценивать вмещающие породы.

Кроме того, следует обратить внимание на степень геохимической однородности изучаемых образований: чем выше геохимическая неоднородность, тем более нарушено в системе первичное

содержание элемента и тем более подготовлена система к «отдаче» этого элемента. Это не что иное как принцип градиентности А.А.Смылова [30].

5.2. Определение основных геохимических рубежей

Этого типа задачи решают для уточнения условий образования и прогнозной оценки подстилающих и вышележащих образований. По существу речь идет об изучении зон нарушений различных геохимических параметров (например, нарушение первичного распределения химических элементов и меры связи между ними). А.А.Смыловым [30], Л.Н.Овчинниковым, С.В.Григорьяном, Э.Н.Барановым [21], Д.В.Рундквистом (1971, 1975 гг.) выделены геохимически сильно дифференцированные области, внутри которых отмечены зоны протяженностью от десятков до тысяч километров. Сама по себе кора выветривания (в целом) представляет собой геохимический рубеж по отношению к другим (неэлювиальным) образованиям.

Определение геохимических рубежей имеет вполне прикладной смысл, свидетельствуя о возможностях использования полученных данных. Так, при определении бокситоносности следует ориентироваться на результаты опробования самых верхних горизонтов коры выветривания, а при оценке потенциальной рудоносности исходных пород следует использовать результаты опробования только нижних горизонтов коры.

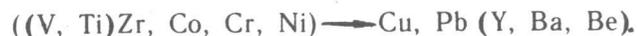
Определяют геохимические рубежи при изучении разрезов и площадей с помощью методов корреляционного и дисперсионного анализов. При этом следует использовать сведения о распространении химических элементов и образуемых ими ассоциаций, а также о степени равномерности (градиентности) их распределения в изучаемых образованиях.

5.2.1. Основной геохимический рубеж в элювиальных образованиях совпадает с границей каолиновой и нижележащих зон [22]. Для примера рассмотрим гиббситовую (аллитовую) формацию коры выветривания Гвинеи, геохимические ассоциации всех зон которой приведены ниже.

Исходные образования (сланцы, изверженные породы среднего и основного состава):



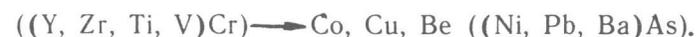
Гидрослюдисто-каолиновая зона:



Каолиновая зона:



Латерит рыхлый:



Латерит каменистый:



Бовальная кираса:



Шлейфовая кираса:



Распределение элементов по ассоциациям в исходных породах сходно с таковым в типичных магматогенных [23, 35] образованиях: в одну группу здесь объединены фемафилы — медь, никель, хром, в другую фельсифилы — свинец, барий, бериллий и др. Картину сходства с магматическими образованиями нарушает лишь фемафил ванадий, связанный (правда, очень слабо) с фельсифилами.

Гидрослюдисто-каолиновый горизонт отличается от исходных пород поведением трех элементов: титан и ванадий присоединяются к никелю и другим элементам, а со свинцом, барием и другими связана медь. Остальные элементы характера связей почти не изменяют.

Породы каолинового горизонта уже значительно отличаются от исходных образований. Существующая здесь группировка элементов отражает, по-видимому, свойства их подвижности в зоне гипергенеза — одну из ассоциаций слагают элементы, как правило, слабо подвижные, в этой зоне (титан, хром, бериллий и др.), другую — подвижные (свинец, медь, барий и др.).

Латериты (рыхлые и каменистые бокситы) и породы бовальной кирасы практически не отличаются друг от друга по характеру связей. Они весьма сходны с каолиновым горизонтом, отличаясь от него поведением только бериллия.

Наконец, образования шлейфовой кирасы вновь обнаруживают перестройку связей между элементами: в отличие от бокситов и пород бовальной кирасы бериллий и никель объединяются здесь с хромом, ванадием и титаном.

Итак, по характеру ассоциаций в разрезе гиббситовой элювиальной формации можно выделить три главные геохимические зоны (которые отличают, очевидно, и условия формирования): 1 — гидрослюдисто-каолиновая (совпадает с одноименной литологической зоной); 2 — каолинит-гиббситовая (включает каолиновую зону, латериты и бовальную кирасу); 3 — гиббсит-гетитовая (совпадает со шлейфовой кирасой).

Геохимические зоны отражают этапность образования профиля: гидрослюдисто-каолиновая обнаруживает определенное

сходство с исходными породами, т.е. частично сохраняет связи материнских образований; каолинит-гипсбитовая показывает полное разрушение связей, свойственных материнским породам, и формирование новых, типичных для зоны гипергенеза; гипсбит-гетитовая отвечает новой перестройке связей, определяемой, вероятно, перемещением продуктов выветривания, что должно характеризовать геохимический рубеж элювий — осадочные породы.

Таким образом, геохимический рубеж гипсбитовой элювиальной формации проходит между гидрослюдисто-каолинитовыми и каолинит-гипсбитовыми образованиями, что указывает на принципиальные отличия в условиях их формирования. Если это так, то наиболее информативным при оценке, например, бокситоносности кор выветривания следует признать каолинитовый горизонт. Разумеется, при определении рудоносности исходных пород по этой же причине (геохимический рубеж) нужно ориентироваться на нижние горизонты кор (в нашем случае гидрослюдисто-каолинитовый, в других — хлоритовый, гидрослюдистый, монтмориллонитовый).

5.2.2. Следует обратить внимание на уже известную по литературе зональность различных рудных объектов [4, 21, 23, 30 и др.]. Вероятно, эти сведения несут информацию и об основных геохимических рубежах. Так, последовательность проявлений в различных формациях свинцово-цинковой (галенит-сфалеритовой) минерализации позволила Д.В.Рундквисту выделить ее в качестве репера для привязки других зон. Вполне возможно, что это один из главных геохимических рубежей (на уровне геологических формаций).

5.2.3. Геохимическая зональность и изучение основных рубежей может быть успешно использована для прогноза месторождений различных полезных ископаемых. Так, для золото-серебряных месторождений С.Н.Калабашкиным установлено различие ассоциаций региональных и локальных аномалий. Вероятно, это справедливо и для других типов рудных месторождений (и их элювия). Кроме того, для геохимических структур ассоциаций характерна последовательность чередования определенных групп элементов. Поэтому нарушения структур и распределений химических элементов (именно это мы наблюдаем на основных геохимических рубежах) могут быть использованы для диагностики как формационных типов, так и конкретных рудных формаций.

5.3. Изучение степени связи осадочных толщ с корами выветривания

Подобные задачи могут быть поставлены при прогнозной оценке крупной территории или в связи с выбором направления поисковых работ. Это — типичный пример органического

слияния геологических и геохимических задач. Помимо оценки суммарной и относительной подвижности изучаются обычные содержания и дисперсии комплекса химических элементов в горных породах и геологических формациях. Используют данные количественных и приближенных анализов, в том числе результаты спектрального анализа. Вычисляют кларки концентраций и относительные концентрации химических элементов для определения степени сходства и различия изучаемых образований как в пределах одного, так и разных геологических объектов.

Обилие вычислений требует немало времени и нередко отталкивает геологов. Чтобы избежать ненужных потерь времени, во ВСЕГЕИ разработаны специальные программы (дискриминантный и кластерный, некоторые приемы факторного анализа), которые позволяют быстро и точно решать подобные задачи с помощью ЭВМ.

Этого типа группа задач была решена составителем рекомендаций в связи с проблемой бокситоносности Сибирской платформы. Удалось установить отсутствие прямой связи бокситопроявлений с корами выветривания. Соответственно пришлось отвергнуть столь популярную среди геологов латеритную концепцию и ориентировать геологические организации на поиски осадочных рудных залежей, связанных с определенным типом разреза и конкретными структурными условиями.

Подобный подход будет весьма продуктивным при работе со стратиформными залежами — при их количественной прогнозной оценке, поисках вероятных источников сырья и выборе прогнозных и поисковых критериев.

5.4. Определение геохимической специализации кор выветривания

Под геохимической специализацией понимают тенденцию одного или группы химических элементов к концентрации. Способы ее распознавания можно свести к четырем простейшим.

5.4.1. Резкое повышение содержания элемента или группы элементов по сравнению с кларком или средним содержанием в исходных, элювиальных породах, формациях и т.п. Дополнительным признаком для уточнения геохимической специализации служит оценка степени равномерности (неравномерности) распределения элемента (группы элементов) в изучаемой системе. Неравномерность распределения выражена в высоких коэффициентах вариации содержания элемента в разрезе и характеризует его способность к резкому выделению (преобладанию — с позиций закона действующих масс) в самостоятельную систему (например: химический элемент —> минерал —> горная порода —> рудная формация и т.д.).

5.4.2. Резкая потеря элементом (группой элементов) подвижности — этот показатель даже при явно невысоких концентрациях всегда заслуживает внимания. Подобные данные могут свидетельствовать о переходе основной массы химического элемента из растворенной части в состав взвеси.

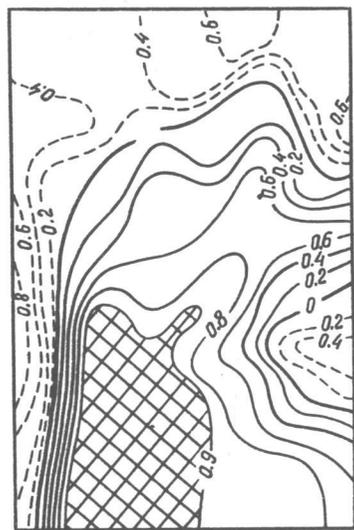
5.4.3. Высокая подвижность химических элементов при резко выраженной градиентности может свидетельствовать об эпигенетических (с влиянием хемогенного и эндогенного факторов) и диагенетических преобразованиях (подвижность элементов внутри системы) или о близости геохимических барьеров. И в том, и в другом случае возможно появление высоких концентраций.

5.4.4. Резкий «отрыв» химического элемента (или группы элементов) от всех прочих в структуре геохимических ассоциаций.

Практически речь идет об элементах, которые в ассоциациях очень слабо связаны с остальными, но содержания которых обладают очень высокими вариациями. Сочетание таких признаков может и при отсутствии аномально повышенных содержаний указывать на возможность обнаружения повышенных концентраций элементов в изучаемых образованиях (элювиальных горизонтах, породах, формациях).

5.4.5. Практический интерес представляет выяснение геохимической специализации глубоко залегающих кор выветривания. Для опробования выбирается какая-либо доступная поверхность, например, породы, залегающие непосредственно под почвой. Наиболее перспективно для оценки на глубину — использование данных обычной металлометрии.

Подобного типа задача была решена В.С.Певзнером совместно с Ю.К.Бурковым и В.И.Мишиным в одном из районов



Карта изокоррелят никель—кобальт в районе погребенной залежи силикатного никеля

Штриховые линии — отрицательные; сплошные — положительные коэффициенты корреляции; заштрихованная территория — зона с коэффициентами корреляции выше +0,9.

Южного Урала [22, 23]. Был выбран район, где на глубинах от 50 до 350 м от поверхности в коре выветривания находится залежь силикатного никеля. Данные металлометрического опробования были обработаны на ЭВМ БЭСМ-4 по программе, реализующей шаговую регрессионную модель (см. выше, раздел «Скользящее окно. Тренд-анализ»). В результате удалось достаточно точно оконтурить участок с наиболее богатой залежью. Лучше всего это видно на карте изокоррелят никель—кобальта (рисунок), отстроенной Ю.К.Бурковым. Таким образом, тренд-анализ в сочетании со структурным геохимическим анализом (ассоциации и степень связи отдельных пар и групп химических элементов) позволяют геологически обоснованно определить самую богатую часть рудной залежи даже тогда, когда она перекрыта чехлом терригенных меловых, палеогеновых и четвертичных отложений. Следовательно, решение задач по определению геохимической специализации различных (в том числе погребенных) кор выветривания и перспективно, и вполне реально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатырев Б.А., Демина В.Н., Шишаков В.Б. Использование метода корреляционного анализа для характеристики геохимических особенностей пород коры выветривания и бокситов (на примере Средней Азии, Тимана и Южного Урала). В кн.: Матер. семинара по геохимии гипергенеза и коры выветривания. Минск, 1969, с. 18—23.
2. Бурков В.В., Потемкин К.В., Пятнов В.И. Новые данные о месторождениях кор выветривания и россыпях тантала за рубежом. М., «Наука», 1972. 76 с.
3. Бурков Ю.К. Линейные парагенезисы малых элементов в осадочных толщах как индикаторы седиментогенеза. — В кн.: Физ. и хим. процессы и фации. М., «Наука», 1968, с. 22—26.
4. Бурков Ю.К., Рундквист Д.В. Накопление рудных элементов в процессе эволюции земной коры. — «ЗВМО», 1977, вып. 5, с. 629—637.
5. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. — «Геохимия», 1962, № 7, с. 555—571.
6. Витовская И.В., Никитина А.П. Минералого-геохимические особенности образования кор выветривания на разных породах. — В кн.: Матер. семинара по геохимии гипергенеза и коры выветривания. Минск, 1969, с. 59—69.
7. Геологическая съемка районов развития кор выветривания. Метод. указания по геол. съемке м-ба 1:50 000. Вып. 5. Л., «Недра», 1973. 120 с.
8. Гинзбург И.И. Типы древних кор выветривания, формы их проявления и классификация. — В кн.: Кора выветривания. Вып. 6. М., 1963, с. 70—101.
9. Головенко В.К. Докембрийские коры химического выветривания, их особенности и методика литолого-геохимического изучения. — В кн.: Докембрийские коры выветривания. М., ВИМС, 1975, с. 16—27.
10. Гузовский Л.А. Методика и результаты работы по картированию кор выветривания Урала. — В кн.: Кора выветривания. Вып. 6. М., «Наука», 1963, с. 283—288.
11. Думлер Ф.Л., Шейнина Г.А. Статистическое планирование экспериментов для дифференцированного исследования аналитической и природной дисперсий. — «Геохимия», 1973, № 3, с. 465—470.

12. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М., 1965. 227 с.
13. Лисицына Н.А. К методике геохимического изучения кор выветривания. — «Литол. и полезн. ископ.», 1966, № 6, с. 3—18.
14. Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. М., «Мир», 1967. 144 с.
15. Малич Н.С., Певзнер В.С. Корообразование в свете полициклического развития платформенного чехла Сибири. — В кн.: Кора выветривания и гипергенное рудообразование. М., «Наука», 1977, с. 32—35.
16. Методическое пособие по металлогении. М., «Недра», 1976. 271 с.
17. Миллер Р., Кан Дж. Статистический анализ в геологических науках. М., «Мир», 1965. 482 с.
18. Михайлов Б.М. Некоторые вопросы геохимии древней коры выветривания. — В кн.: Исследование и использование глины. Львов, Изд-во Львовск. ун-та, 1958.
19. Никитин К.К. Классификация кор выветривания и связанных с ними месторождений полезных ископаемых. — В кн.: Кора выветривания. Вып. 10. М., «Наука», 1968, с. 30—51.
20. Новые данные по геологии бокситов. Сб. научных трудов. Вып. 5. ВИМС, М., 1977. 116 с.
21. Овчинников Л.Н., Григорян С.В., Баранов Э.Н. Первичные геохимические ореолы гидротермальных месторождений и их поисковое значение. — В кн.: Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных минералов. М., 1972, с. 17—20.
22. Певзнер В.С. Изучение кор выветривания при крупномасштабной геологической съемке. Л., «Недра», 1974. 25 с.
23. Певзнер В.С., Бурков Ю.К. Система обработки геохимической информации с целью прогноза месторождений полезных ископаемых. Л., «Недра» 1976. 20 с.
24. Петров В.П. Основы учения о древних корах выветривания. М., «Недра», 1967. 343 с.
25. Поверхности выравнивания и коры выветривания на территории СССР. М., «Недра», 1974. 444 с.
26. Подынов Б.Б. Кора выветривания. М., Изд-во АН СССР, 1934. 240 с.
27. Рудник В.А. Объемно- и нормативно-атомные петрохимические системы пересчетов. М., «Недра», 1978. 278 с.
28. Сапожников Д.Г. Основы прогноза осадочных рудных месторождений. М., «Недра», 1972. 208 с.
29. Сафронов Н.И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., «Недра», 1971. 216 с.
30. Семенов А.И., Емыслов А.А. Геохимические критерии связи промышленного оруденения с горными породами и проблема источников оруденения. — «Зап. Всесоюз. минер. о-ва», 1967, вып. 5, ч. 96, с. 584—596.
31. Сидоренко А.В., Чайка В.М. Значение кор выветривания и денудационных поверхностей в истории докембрия. — В кн.: Металлогения осадочных и осадочно-метаморфических пород. М., «Наука», 1970, с. 5—29.
32. Соловьев А.П. Основы теории и практики металлотрических съемок. Изд-во АН КазССР, 1959.
33. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Т. 1—3. М., Изд-во АН СССР, 1960—1962. 760 с.
34. Теняков В.А. Бокситообразование в геологической истории Земли и проблема бокситов докембрия. — В кн.: Докембрийские коры выветривания. М., 1975, с. 52—65. (Сб. научных трудов ВИМС).
35. Ферсман А.Е. Геохимия. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1934. 370 с.
36. Цехомский А.И. О закономерностях размещения полезных ископаемых кор выветривания. — «Сов. геология», 1974, № 2, с. 55—67.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Комплекс лабораторных методов изучения элювиальных пород	4
2. Полевое геохимическое опробование	5
3. Изучение минеральной зональности кор выветривания	6
4. Основные геохимические параметры и методы их получения	8
4.1. Средние и дисперсии. Сопоставимость результатов	9
4.2. Коэффициенты корреляции	11
4.3. Геохимические ассоциации	13
4.4. Многократная корреляция	14
4.5. Метод главных компонент факторного анализа	14
4.6. Ряды подвижности. Баланс вещества	15
4.7. Кларки концентраций и относительные концентрации	19
4.8. «Скользющее окно». Тренд-анализ	20
4.9. Индикаторные отношения	21
5. Основные типы геохимических задач. Методы их решения. Геологическая интерпретация	22
5.1. Выяснение характера распределения и поведения химических компонентов	23
5.2. Определение основных геохимических рубежей	24
5.3. Изучение степени связи осадочных толщ с корах выветривания	26
5.4. Определение геохимической специализации кор выветривания.	27
Список литературы	29