

9. Сафина, Н.П. Минералого-геохимические особенности сульфидных руд рудопроявления «Западное», Приполярный Урал / Н.П. Сафина, В.В. Масленников, С.П. Масленникова // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа–Югры. — Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2010. — Кн. 2. — С. 492–500.

10. Cathelineau, M. Chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) geothermal system / M. Cathelineau, D.A. Nieva // Contributions to Mineralogy and Petrology, 1985. — Vol. 91. — № 3. — PP. 235–244.

11. Ciobanu, C.L. Gold scavenged by bismuth melts: An example from Alpine shear-remobilizates in the Highiş Massif, Romania / C.L. Ciobanu, N.J. Cook, F. Damian, G. Damian // Mineralogy and Petrology. — 2006. — № 87. — PP. 351–384.

12. Tomkins, A.G. Three mechanisms of ore re-mobilisation during amphibolites facies metamorphism at the Montauban Zn–Pb–Au–Ag deposit / A.G. Tomkins // Mineralium Deposita, 2007. — V. 42. — PP. 627–637.

© Кудрин К.Ю., 2019

Кудрин Константин Юрьевич // kudringeo@inbox.ru

УДК 550.8 681.3

Галюк С.В. (ФГБУ «ИМГРЭ»)

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД

*В статье дан краткий обзор наиболее распространенных геохимических классификаций и их базовые таксономические принципы. Предложена версия классификации элементов для атмо- и литохимических методов при поисках коренного гидротермального полисульфидного оруденения. Сформулированы базовые принципы разделения элементов на группы. В качестве иллюстрации правомочности предложенных принципов приводятся две эмпирически полученные закономерности. **Ключевые слова:** геохимическая классификация элементов, атмо- и литохимические методы поисков, элементы-индикаторы.*

Galyuk S.V. (IMGRE)

GEOCHEMICAL CLASSIFICATION OF CHEMICAL ELEMENTS: HISTORY AND CURRENT VIEWS

*The paper presents a brief overview of the most common geochemical classifications and their basic classification principles. The aspects of the classification of chemical elements as tools of the gas and soil surveys for the bedrock hydrothermal polysulfide mineralization are provided. The basic classification principles of chemical elements are formulated. To illustrate the validity of the proposed principles, two empirically derived patterns are presented. **Keywords:** geochemical classification of chemical elements, gas and soil surveys, pathfinder and indicator elements.*

Классификация в любой науке обобщает и фиксирует актуальный (на дату ее создания) уровень развития данного научного направления. Цель классификации объектов — суммирование знаний на определенном этапе развития науки, объединение изучаемых объектов по определенным критериям в таксоны для

решения задач конкретной направленности. Как правило, в основе любой геохимической классификации химических элементов на сегодняшний день лежит Периодическая система элементов Д.И. Менделеева. В настоящее время в геохимии известны более полутора десятков классификаций химических элементов. Наиболее известными из них являются классификации В.М. Гольдшмидта, А.Е. Ферсмана, В.И. Вернадского, А.Н. Заварицкого, А.А. Саукова, А.И. Перельмана.

Классификации А.Е. Ферсмана, А.Н. Заварицкого и А.А. Саукова основаны на поведении химических элементов в гипогенных условиях; В.М. Гольдшмидта и В.И. Вернадского — отражают поведение элементов как в гипо- так и гипергенных условиях. Классификация А.И. Перельмана соответствует поведению химических элементов в условиях зоны гипергенеза в различных ландшафтах.

В 1911 г. **В.М. Гольдшмидт** опубликовал первую в истории геохимическую классификацию, в которой все элементы в зависимости от их преобладания в одной из природных сред разделены на атмофильные элементы, тяготеющие к атмосфере; сидерофильные, связанные с большими глубинами планеты, родственные с входящим в эту группу железом (металлическое ядро); халькофильные, тяготеющие к меньшим глубинам, чем сидерофильные элементы (сульфидметаллическое ядро) и литофильные элементы, приуроченные к силикатной оболочке Земли. В более поздних изданиях автор ввел группу биофильных элементов.

Классификация В.М. Гольдшмидта сохранила свое значение и широко используется в практике геохимических работ, несмотря на то что его гипотеза о строении Земли представляет лишь исторический интерес в плане развития науки. В.М. Гольдшмидт сравнил дифференциацию элементов в расплавленной планете с выплавкой металлов из руд, когда на дно металлургической печи опускается тяжелый металл с плотностью 7 и более г/см³, а на поверхность всплывает легкий силикатный шлак (аналог земной коры). Между ними располагается слой «штейна» (сульфида Fe) с примесью сульфидов других металлов (аналог мантии) (рис. 1).

Литофильные элементы образуют кислородные соединения, их ионы имеют 8-электронную оболочку. К ним относятся 54 элемента (Si, Fe, Ti, Cl, Br, B, Al, Ca, Mg и др.). Для *халькофильных элементов* характерно взаимодействие с серой, а также селеном и теллуром. Внешняя оболочка катионов имеет 18-электронную конфигурацию (Cu, Zn, Pb, Cd, Fe, Co и др.). Природные соединения образуют сульфиды и их аналоги. *Сидерофильные элементы* (Ni, Mo, Co, Os, Pd, Ir, Pt, Au, Ta и др.) в расплавах соединяются с железом. Они представлены атомами, которые образуют переходные ионы с внешней оболочкой 9–17-электронной конфигурации. *Атмофильные элементы* характерны для атмосферы, их атомы имеют электронную конфигурацию инертных газов (2–8-электронную). *Биофильные элементы* (C, H, O, N, P, S, Cl, Na, Ca, Mg, Fe и др.) концентрируются в живых организмах с образованием

**В.М. Гольдшмидт
5 групп**

Рис. 1. Геохимическая классификация элементов по В.М. Гольдшмидту: 1–5 — элементы: 1 — сидерофильные; 2 — литофильные; 3 — атмосфильные; 4 — халькофильные; 5 — биофильные

**В.И. Вернадский
6 групп**

Рис. 2. Геохимическая классификация элементов по В.И. Вернадскому: 1 — инертные газы; 2 — благородные металлы; 3 — рассеянные элементы; 4 — радиоактивные элементы; 5 — циклические элементы; 6 — редкоземельные элементы (в усеченном до 7 периодов варианте таблицы не отображены)

различных соединений. В классификации В.М. Гольдшмидта некоторые элементы сочетают в себе свойства сидерофильных и халькофильных элементов (например, Co), сидерофильных, литофильных и биофильных (например, Fe) одновременно [5].

В 1927 г. великий русский геохимик **В.И. Вернадский** предложил свою версию классификации химических элементов. В ее основу он положил четыре принципа, определяющих историю элементов в земной коре: химическую активность, участие в циклических процессах в биосфере, преобладание рассеянного состояния, высокую радиоактивность (рис. 2).

По классификации В.И. Вернадского [2] выделяют шесть групп элементов. Самая большая по числу элементов — *циклическая* группа (44 элемента), элементы которой слагают почти всю земную кору. Они участвуют в обратимых циклах, образуя химические соединения и отдельные молекулы. Каждый элемент в различных геосферах образует свои соединения, постоянно возобновляющиеся, но после ряда изменений элемент возвращается к исходному соединению и начинает новый цикл. Важную роль в таком круговом процессе играет живое вещество, не только для таких элементов как O, C, N, H, S, но и для металлов (Fe, Si, Zn, Mn и др.). Однако круговой процесс не является вполне обратимым, т.к. часть элементов неизбежно и постоянно выходит из этого процесса.

Группа рассеянных элементов включает Li, Se, Ga, Br, Rb, Y, (Nb), In, I, Cs, Ta. Некоторые из них не образуют своих соединений, другие редко образуют, а все они чаще встречаются в состоянии свободных атомов в виде «следов» в минералах и горных породах. Это тоже циклические элементы, однако в круговом процессе они участвуют как чередующиеся химические соединения и свободные атомы. Те же элементы, которые не образуют своих минералов, присутствуют только в свободном состоянии в живом или неживом веществе. Это элементы нечетные (с нечетными атом-

ными числами), что, вероятно, тоже связано с особенностями их распространения (рассеяния).

Группа сильно радиоактивных элементов состоит из 7 элементов, два из которых (U и Th) дают химические соединения и входят в обратимые циклы. Часть их теряется в ходе кругового процесса, а часть (после распада) дает начало элементам, которые входят в другие классификационные группы (He, Pb).

Редкоземельные элементы (La, Ce, Yb, Sm и др.) или группа лантаноидов характеризуются особым строением атомов и поведением в условиях земной коры.

Благородные или инертные газы (5 элементов — гелий, неон, аргон, криптон, ксенон) входят в состав атмосферы и не принимают участия в химических земных процессах.

Благородные металлы (Pt, Au, Ir, Pd и др.) встречаются в земной коре в самородном виде.

В 1950 г. **А.Н. Заварицкий** опубликовал свою классификационную таблицу [7], которая к настоящему времени является наиболее популярной. В ней он объединил в семейства геохимически близкие элементы. Классификационными признаками он определил следующие базовые признаки: атомную массу, заполненность энергетических уровней, атомный объем, металлические и неметаллические свойства.

Он разделил все элементы на 10 блоков (семейств): 1) *элементы горных пород* (Na, Mg, Al, Si, K, Ca и др.); 2) *благородные газы* (от He до Rn); 3) *элементы группы железа* (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni); 4) *платиноиды* — элементы группы платины (Os, Ir, Pt и др.); 5) *тяжелые галлоиды* (Br, I, At); 6) *группа редких элементов* (Sc, TR, Nb, Ta и др.); 7) *группа элементов сульфидных руд* (Si, Zn, Sn, Hg, Ag и др.); 8) *группа металлоидных и металлогенных элементов* (As, Sb, Bi, Se, Mo, W и др.); 9) *элементы магматических эманаций* (B, F, P, Cl, S и др.); 10) *группа радиоактивных элементов* (Ra, Th, U и др.) (рис. 3).

А.Е. Ферсман (1934) создал классификацию на основе принадлежности химических элементов к различ-



Рис. 3. Геохимическая классификация элементов по А.Н. Заварицкому: 1 — элементы горных пород; 2 — благородные газы; 3 — группа железа; 4 — группа платины; 5 — тяжелые галоиды; 6 — редкие элементы; 7 — металлические рудные; 8 — металлоиды и металлогены; 9 — элементы магматических эманаций; 10 — группа сильно радиоактивных элементов



Рис. 4. Геохимическая классификация элементов по А.Е. Ферсману: 1–4 — элементы: 1 — кислых магм; 2 — элементы средних магм; 3 — основных и ультраосновных магм; 4 — сульфидных месторождений



Рис. 5. Геохимическая классификация элементов по А.А. Саукову: 1–5 — элементы: 1 —щелочных магм; 2 — кислых магм; 3 — мафитов и ультрамафитов; 4 — гидротермалитов; 5 — пегматитов

ному виду эндогенных процессов (рис. 4). Таблица разделена на поля, соответствующие распространению элементов в земной коре: поле элементов *кислых магм и пневматолитов* (цирконий, ниобий, тантал, уран, вольфрам, редкие земли), *средних магм (кальций, стронций, бром, йод и др.)*, *ультраосновных магм* (железо, кобальт, никель титан, ванадий, элементы платиновой группы и др.), поле элементов *сульфидных руд* (медь, свинец, цинк, олово и др.).

А.А. Сауков (1953) развил и дополнил эту концепцию (рис. 5). Элементы земной коры были разделены на пять групп в зависимости от типа и состава эндогенного процесса. Характерной особенностью данной классификации является то, что многие элементы включены в две и более групп. Фосфор, фтор и таллий входят в состав сразу четырех классификационных ячеек. Некоторые же элементы не принадлежат ни к одной из групп.

Классификация химических элементов, составленная А.И. Перельманом, соответствует их поведению в условиях зоны гипергенеза. В основу классификации положены интенсивность, контрастность, виды миграции элементов в различных геохимических обстановках, а также их свойства и кларки. Химические элементы разделены на две основные группы по форме миграции: на воздушные и водные.

Все представленные классификации непротиворечивы, дополняют друг друга и подчинены основному

закону геохимии В.М. Гольдшмидта: *кларки элементов зависят от строения атомного ядра, а их миграция — от наружных электронов, определяющих химические свойства элементов*. Следствием этого является схожесть в строении орбиталей (электронных оболочек) родственных элементов и соответственно компактное расположение в периодической таблице Д.И. Менделеева.

Авторская классификация химических элементов для прогнозных и поисковых геохимических работ

Классификации элементов для интерпретации геохимических аномалий при поисках месторождений твердых полезных ископаемых к настоящему времени в специальной и периодической литературе не обнаружено. Накопленный сорокалетний опыт в поисковой геохимии, в том числе двадцатилетней кураторской работы, позволил сделать попытку осуществить первый шаг в этом направлении. В данной работе рассматриваются аспекты классификации элементов для атмо- и литохимических методов при поисках коренного гидротермального полисульфидного оруденения.

Прежде всего, о неоднозначно трактуемом понятии «интерпретация». По мнению автора, это не просто констатация перечня элементов, входящих в аномалию и расчет их статистических характеристик, а дифференциация площади по степени перспективности на обнаружение искомого типа оруденения, которая осуществляется путем решения трех задач: определе-

ния промышленного типа оруденения, определение его локализации и оценки масштаба проявленности (другими словами — что, где и в каком количестве).

В технологии интерпретации геохимических данных есть две наиболее сложные процедуры, без качественного выполнения которых невозможно получение достоверного результата. Первое — разделение элементов, входящих в аномалию, на «родственные», связанные единым рудным процессом, и случайные, суперпозиционные попутчики, не имеющие к рудному процессу непосредственного отношения (соседи). И второе — оценка распространения оруденения на глубину (размер рудной подвески), без которого получение итогового результата геохимических поисков просто невозможно. Отсутствие обоснованной оценки вертикального размаха оруденения и, как следствие, использование декларативных глубин (в 100 м или любое другое) однозначно приводит к ошибочному результату и, как следствие — к дискредитации геохимических методов поисков. Величина (продуктивность) гипергенного ореоля поля функционально определяется объемом эродированной массы первичного ореоля и при неизвестном уровне эрозионного среза не имеет отношения к величине оставшейся в недрах ее части. Поэтому принцип подобия — чем выше площадная продуктивность вторичной аномалии, тем больше ресурсы ожидаемого оруденения — выполняется только при условии доказанного одинакового уровня эрозионного среза.

В предложенной классификации элементов особое внимание уделено тем из них, которые позволяют решать эти проблемы. Элементы объединены в 14 групп (рис. 6).

В группу **атмофильных** объединены следующие элементы: водород, азот и инертные газы. В практике поисковых работ используется атмогеохимический метод гелиевой съемки и радоновая (эманационная) съемка. Оба газа имеют глубинное происхождение, поэтому их присутствие может свидетельствовать о наличии путей миграции — по глубинным разломам, зонам тектонической трещиноватости или линейным. Эти методы позволяют трассировать тектонические нарушения и определять их активность, выявлять зоны трещиноватости и повышенной флюидопроводимости, вдоль которых осуществляется активная миграция поровых гидротермальных потенциально рудоносных растворов.

В группу **галогенов** включены пять элементов: фтор, хлор, йод, бром и астат. Возможность формирования атмохимических ореолов йода и брома неоднократно подчеркивалась Н.Н. Трофимовым, А.И. Рычковым [11], В.З. Фурсовым, А.А. Левинсоном, Л.Н. Овчинниковым [8], С.В. Григоряном и др. Так, В.З. Фурсов указывал, что (учитывая общие принципы рудогенеза) следует ожидать над рудными месторождениями газовые ореолы йода, хлора и брома [12]. А.А. Левинсон и Н.Н. Трофимов неоднократно подчеркивали, что с медно-полиметаллическими и другими типами рудных месторождений ассоциирует йод и бром, поэтому почвенные газы с повышенной их концентрацией над такими и аналогичными объектами могут дать ценную поисковую информацию [11].

Применение атмохимических методов поисков рудных месторождений наиболее целесообразно при масштабе исследований 1:50 000–1:10 000. Эти исследования могут проводиться как самостоятельно, так и в комплексе с другими геологоразведочными работами. Атмохимические поиски в целом являются косвенными, однако тщательный анализ физико-химических условий образования газовых ореолов часто дает достаточные основания для уверенной геологической интерпретации выявленных аномалий и установления связи с месторождениями.

Метод сравнительно дешевле, может быть применен в различных геоморфологических обстановках и в условиях существенного перекрытия рыхлыми палеоген-четвертичными отложениями мощностью от 20–100 м.

Группа **петрогенных элементов**. Отличительной их особенностью является то, что они слагают более 99,48 % элементов литосферы и кларк каждого из них (кроме бора) более 0,1 %. Эта группа объединяет 14 элементов: бор, углерод, кислород, натрий, магний, алюминий, кремний, фосфор, серу, калий, кальций, титан, марганец и железо. Элементы этой группы широко используются при региональных геохимических работах как самостоятельно, так и в составе формационного и фациального анализа для оценки рудоносности вмещающих комплексов и решения вопросов металлогении.

Понятие «петрохимия» введено А.Н. Заварицким (1944). Петрохимические пересчеты используются для расчета численных индексов и коэффициентов по химическому анализу породы. Эти индексы представляют собой функции многих переменных и применяются

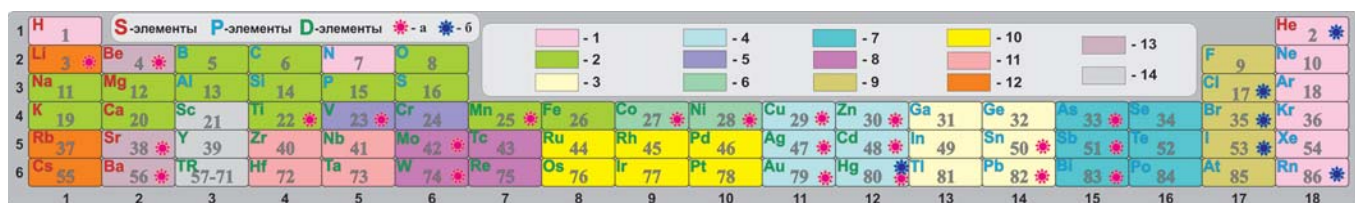


Рис. 6. Потенциальные элементы-индикаторы поисков: а — литохимических, б — атмохимических; элементы: 1 — атмофильные, 2 — петрогенные, 3 — р-халькофильные, 4 — d-халькофильные, 5 — сидерофильные легкие, 6 — сидерофильные тяжелые, 7 — р-металлоиды, 8 — d-металлоиды, 9 — галогены, 10 — группа платины, 11 — редкие, 12 — рассеянных щелочей, 13 — щелочноземельные, 14 — редкоземельные

для: оценки минерального состава горных пород; дискриминационных целей (разделение пород на группы и генетические серии); сравнения с данными экспериментов и численного моделирования; реконструкции исходной породы по химическому составу в случае вторичных или метаморфических изменений породы. Для сравнения результатов пересчетов широко применяются петрохимические диаграммы [7]. Система расчета химических анализов магматических горных пород (и нанесение полученных данных на диаграмму векторов), предложенная А.Н. Заварицким, выделяет три химических класса (ряда) указанных горных пород:

I — нормальный (содержание Al_2O_3 больше суммы окислов Na и K, но меньше суммы окислов Ca, Na и K);

II — плюмазитовый (пересыщенный глиноземом, т.е. глинозем преобладает над суммой окислов Ca, Na и K);

III — агапитовый (пересыщенный щелочами, т.е. содержание окислов Na и K преобладает над глиноземом) [9].

В ИМГРЭ ведущими специалистами в этой области были Л.С. Бородин (Петрохимия магматических серий) и Е.Н. Алтухов (Основы редкометалльной металлогении). За рубежом распространены системы пересчетов группы американских ученых У. Кросса, Дж. Иддингса, Л. Пирсона и Г. Вашингтона — метод CIРW, швейцарского геолога П. Ниггли и др.

Сидерофильные элементы

Целесообразность разбиения группы сидерофильных элементов (по А.Н. Заварицкому) на два семейства объясняется существенным различием их роли при интерпретации геохимических данных.

В семейство **тяжелых сидерофильных элементов** входят кобальт и никель. Это важные элементы зональной колонны полисульфидных рудных объектов как в осевой, так и в поперечной зональности. В первом случае они могут входить в комплекс высокотемпературных элементов нижнерудного или подрудного уровня, определяющего уровень эрозионного среза объекта, а во втором случае — служить для определения степени рассеянности — концентрированности оруденения.

В семейство **легких сидерофильных элементов** также входят два элемента — ванадий и хром. Непосредственными элементами-индикаторами они не являются, но при поисках по гипергенным средам позволяют определять возможность (или невозможность) использования тяжелых сидерофилов как элементов-индикаторов. В случае их пространственной корреляции с тяжелыми сидерофильными элементами — это признак наличия выхода на поверхность пород основного состава, что не позволяет использовать тяжелые сидерофильные элементы в качестве элементов-индикаторов, так как они могут быть генетически с ним несвязанными.

Халькофильные элементы

Аналогично группе сидерофильных элементов представляется целесообразным разбиение семейства

халькофильных элементов на две подгруппы по 6 элементов в каждой. Основанием для этого служит различие в их поведении в ореольном поле, а инструментом разбраковки — строение их атомов: d-халькофильные элементы относятся к переходным металлам, которые в кристаллическом состоянии обладают ковалентно-металлической связью; p-халькофильные элементы относятся к умеренно активным металлам. Обобщенные электронные формулы d-халькофильных элементов — $(3-5) d^{10}(4-6) s^{(1-2)}$, p-халькофильных элементов — $(4-6) s^1(4-6) p^{(1-2)}$.

В группу **d-халькофильных элементов** входят: медь, цинк, серебро, кадмий, золото, ртуть. Они являются основными компонентами сульфидных рудных месторождений, как правило, играют роль базовых элементов-индикаторов сульфидного оруденения и входят в состав геохимической зональной колонны рудных объектов [6]. Они являются обязательными диагностируемыми элементами лабораторно-аналитических работ при литохимических поисках и при интерпретации геохимических данных.

Миграционные способности элементов этого семейства весьма схожи в эндогенных условиях, что же касается гипергенных сред, то дифференциация рассеяния их весьма сильна. От наиболее проявленных свойств к россыпе- и потокообразованию у золота и практически полного их отсутствия у меди (рис. 7, 8).

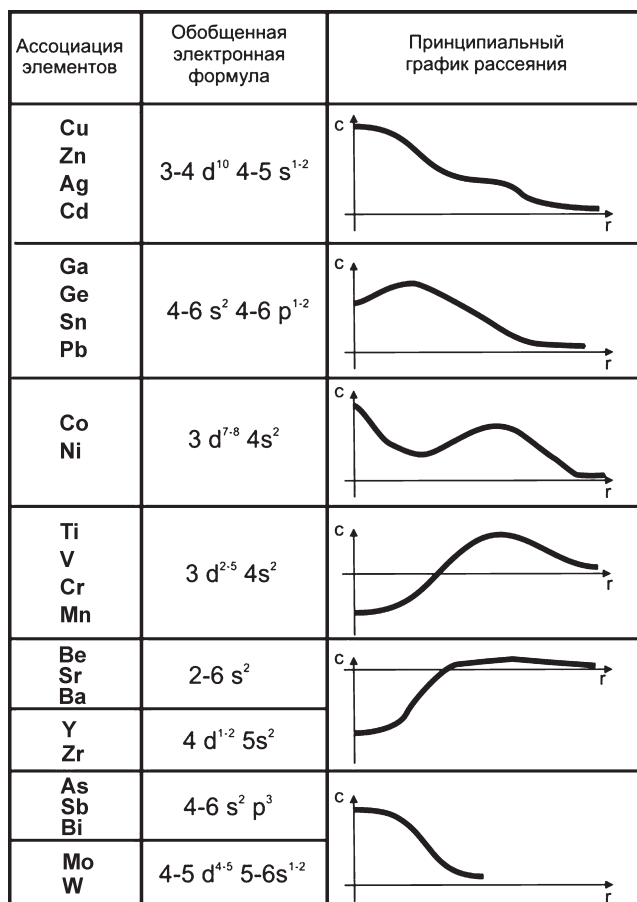


Рис. 7. Закономерности рассеяния химических элементов от центра оруденения до фоновых областей по палеолатерали

Также в эту группу входит ртуть — основной элемент газортутной съемки. Геохимическое сродство ртути с серой определяет ее принадлежность к числу халькофильных элементов и обеспечивает повышенные содержания в сульфидных минералах. Замечательное свойство ртути — высокая летучесть и способность восстанавливаться в гипергенных условиях до самородного состояния определяют работоспособность метода газортутной съемки — в целом косвенного метода поисков рудных месторождений и только для собственно ртутных месторождений — прямого.

В группу **p-халькофильных элементов** входят: галлий, германий, индий, олово, таллий и свинец. При литохимических поисках полисульфидных коренных руд применимы и в качестве объекта поисков, и в качестве элементов-индикаторов два элемента — олово и свинец. Геохимическая природа олова двойственна в зависимости от режима кислорода и серы. Этим определяется его высокая миграционная способность и присутствие как в пегматитах, грейзенах, так и в сульфидных месторождениях, где оно накапливается в оловосеребряных и оловополиметаллических рудах.

Свинец в эндогенных условиях весьма близок к цинку, что обуславливает их совместное накопление в месторождениях. Различные условия кристаллизации сульфидов цинка (более высокотемпературные) и свинца являются одной из причин рудной зональности залежей, в которых сфалерит концентрируется в нижних частях, а галенит ближе к поверхности. В экзогенных условиях пути свинца и цинка расходятся. В зоне выветривания свинец слабо мигрирует и накапливается в форме малорастворимых англезита, церуссита, тогда как цинк, переходящий в хорошо растворимый сульфат, выносится на значительные расстояния и может накапливаться в карбонатной среде в виде смитсонита.

Металлоидные элементы

Группа «металлоидных и металлогенных элементов» (по А.Н. Заварицкому) нами была разделена на два семейства с обобщенными электронными формулами p-металлоидов — $(4-6) s^2(4-6) p^{(3-4)}$ (это полуметаллы со свойствами, присущими как металлам, так и неметаллам, образованием ковалентной кристаллической решетки и наличием металлической проводимости) и d-металлоидов — $(0-4) 4f^4(4-5) d^{(4-5)}(5-6) s^{(1-2)}$ (со всеми свойствами переходного металла).

В группу **p-металлоидов** включены шесть элементов: мышьяк, сурьма, висмут, селен, теллур и полоний. При геохимических поисках коренных полисульфидных рудных объектов важную роль играют мышьяк, сурьма, висмут. В том или ином виде они фиксируются на всех стадиях магмо- и рудогенерирующего процесса. По мнению В.И. Смирнова, «есть все основания полагать,

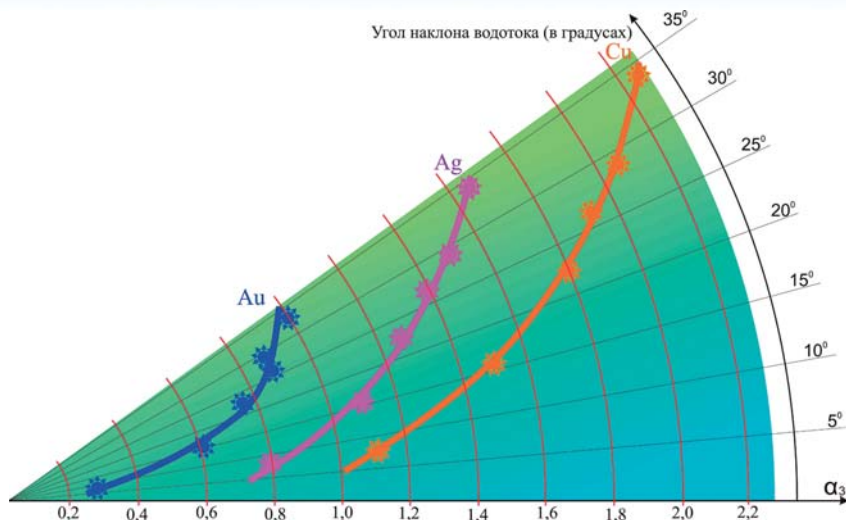


Рис. 8. Графики значений коэффициента соответствия α_3 в зависимости от угла падения потока

что мышьяк, сурьма, висмут геохимически активно участвуют в процессах позднемагматического и раннепостмагматического рудообразования (месторождения магматической, пегматитовой, карбонатитовой, скарновой, альбит-грейзеновой и колчеданной групп) [10]. Особое значение эти элементы играют при поисках золоторудного оруденения, где им отведена важнейшая роль при интерпретации данных, связанных с определением типа оруденения и оценкой уровня эрозионного среза, необходимого при расчете прогнозного ресурсного потенциала геохимической аномалии. В связи с этим возникает необходимость использования специальных лабораторно-аналитических методов диагностики элементов этой группы с близкларковым нижним порогом обнаружения.

В семействе **d-металлоидов** включены четыре элемента: молибден, технеций, вольфрам и рений. Для геохимических поисков особую роль играют молибден и вольфрам.

Минеральные образования вольфрама и молибдена часто встречаются совместно в постмагматических месторождениях. Оба металла в постмагматических растворах проявляют свойства образовывать комплексные соединения, изоморфно замещать друг друга и формировать ассоциации с другими металлами: медью, бериллием, висмутом, ураном, свинцом и цинком. В земной коре максимальные их концентрации создаются в результате гидротермальной деятельности интрузий гранитоидной магмы. Высокотемпературные минералы этих элементов определяют нижнерудную или подрудную ассоциацию элементов большинства типов сульфидных руд. В экзогенных условиях минералы молибдена (и в особенности вольфрама) относительно устойчивы как в почвах, так и в потокообразовании, что позволяет использовать их при поисках по методам потоков и вторичных ореолов рассеяния.

В группу **платины** традиционно включены шесть элементов: рутений, родий, палладий, осмий, иридий, платина. В эндогенных основных и ультраосновных

породах платиноиды присутствуют в виде самородных выделений и сульфидов. Платина и другие металлы этой группы относятся к элементам мало мигрирующим в природных мало минерализованных водах. Коэффициент их водной миграции, по данным А.И. Перельмана, не превышает 0,1. При выветривании основных и ультраосновных пород платиноиды накапливаются в коре выветривания, частично мобилизуются, переходя в истинные и коллоидные растворы как в результате растворения сульфидов, так и вследствие диспергирования зерен самородных элементов.

Формирование контрастных геохимических ореолов платиновых металлов на рудоносных массивах ультрабазитов не характерно. Контрастные ореолы платины формируются на рудоносных породах и месторождениях, где платиноиды непосредственно связаны с сульфидами, при окислении которых образуются соединения, способные переводить платиноиды в растворы. В тех случаях, когда платиноиды находятся в коре выветривания в виде самостоятельных минеральных выделений, они образуют механические ореолы (тем самым повышая контрастность литохимических ореолов), фиксируя контуры рудного тела. Платина положительно коррелируется с хромом, что является следствием их тесного парагенеза в материнских породах. Кроме хрома к главным элементам-индикаторам платиноидов относятся Cu и Ni.

В группу **щелочноземельных элементов** включены бериллий, стронций и барий.

Эти элементы весьма важны для интерпретации геохимических данных. Бериллий потенциально входит в ассоциацию подрудных элементов, а барий — верхнерудных-, надрудных элементов, что необходимо учитывать при количественной оценке величины рудной «подвески» неэродированной части оруденения. Оба элемента могут быть использованы в качестве элементов-индикаторов после подтверждения их принадлежности к зональной колонне гидротермального сульфидного оруденения, а не к зоне карбонатизации или баритизации.

В группу **элементов рассеянных щелочей** включены литий, рубидий и цезий. В качестве элементов-индикаторов полисульфидного оруденения они практически не упоминаются. Встречено упоминание об использовании лития в качестве показателя верхнерудного среза оруденения на золотосеребряном объекте (Г.Я. Абрамсон, 1991) [1].

В группу **редкоземельных элементов** включены скандий, иттрий и лантан (лантаноиды). Примеров их использования в качестве элементов-индикаторов полисульфидного оруденения не установлено.

В группу **редких элементов** включены четыре элемента — цирконий, ниобий, гафний и тантал. Примеров использования их в качестве элементов-индикаторов полисульфидного оруденения не обнаружено.

В качестве иллюстрации правомочности предложенных принципов приводятся две эмпирически полученные закономерности.

Графики распределения концентраций элементов-индикаторов колчеданно-полиметаллического оруденения от центра оруденения до фоновых областей по палеолатерали. Наглядно показано, что структура первичных ореолов эндогенных месторождений определяется электронным строением входящих в них элементов (рис. 7) [3].

В зоне гипергенеза при формировании литохимических потоков рассеяния степень россыпе- и потокообразования также во многом зависит от строения электронных оболочек элементов (рис. 8) [4]. Золото ($5d^{10}6s^1$) имеет максимальную степень потокообразования, серебро ($4d^{10}6s^1$) — промежуточную и медь ($3d^{10}6s^1$) — минимальную. Соответственно один из трех коэффициентов соответствия — α_3 , показывающий соотношение продуктивностей потоков и вторичных ореолов рассеяния (т.е. долю обогащения проб в потоках рассеяния), определяется углом падения потока: он минимальный у золота (< 1), средний у серебра (≈ 1) и максимальный у меди (> 1).

Автор статьи уверен, что развернутая периодическая таблица элементов Д.И. Менделеева максимально удобна для классификационного обобщения накопленного опыта для многих научных направлений, связанных с атомарным строением вещества. В частности, для геохимических поисков других промышленных типов оруденения или для био- и гидрогеохимических методов, которые не входили в сферу обобщения данной статьи, а также для дополнения и коррекции представленных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамсон, Г.Я. Методические рекомендации по использованию геохимических методов при поисках и оценке золоторудных месторождений / Г.Я. Абрамсон, А.Г. Жабин. — М.: ИМГРЭ, 1991. — 104 с.
2. Вернадский, В.И. Труды по геохимии / В.И. Вернадский. — М.: Наука, 1994.
3. Галюк, С.В. Методические рекомендации по созданию параметрических прогнозно-поисковых геолого-геохимических моделей колчеданных месторождений / С.В. Галюк. — М.: ИМГРЭ, 1995. — 48 с.
4. Галюк, С.В. Рекомендации по оценке прогнозного ресурсного потенциала геохимических аномалий / С.В. Галюк, О.В. Менчинская // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 11. — С. 15–17.
5. Гольдшмидт, В.М. Принципы распределения химических элементов в минералах и горных породах. Пер. с нем. / В.М. Гольдшмидт // Успехи химии. — 1938. — Вып. VII. — С. 288–320.
6. Григорян, С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений / С.В. Григорян. — М.: Недра, 1987.
7. Заварицкий, А.Н. Введение в петрохимию изверженных пород / А.Н. Заварицкий. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1944. — 329 с.
8. Овчинников, Л.Н. Образование рудных месторождений / Л.Н. Овчинников. — М.: Недра, 1987.
9. Петрохимия. Аспекты петрологии и металлогении: Сб. науч. тр. / Редкол.: Г.В. Поляков (гл. ред.) и др. — Новосибирск: ИГИГ, 1982. — 153 с.
10. Рудные месторождения СССР в 3-х томах / Под ред. акад. В.И. Смирнова. — М.: Недра, 1978.
11. Трофимов, Н.Н. Роль высокоподвижных компонентов при литохимических глубинных поисках / Н.Н. Трофимов, А.И. Рычков. — М.: Недра, 1988. — 159 с.
12. Фурсов, В.З. Газорудный метод поисков месторождений полезных ископаемых / В.З. Фурсов. — М.: Наука, 1983.

© Галюк С.В. 2019

Галюк Сергей Владимирович // galiouk@imgre.ru

Ганжа О.Ю.¹, Кухмазов С.У.², Ракитов В.А.³, Чернышев Ю.Г.³ (1 — Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2 — АО «Институт Оргэнергострой», 3 — филиал ОАО «ВНИИГеофизика» — Центр ГЕОН)

ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗАПИСЕЙ ВЗРЫВОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОПОРНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОФИЛЯХ ГСЗ И МОВЗ

Представлены основные этапы цифровой обработки данных глубинных сейсмических исследований на опорных и региональных профилях Центра ГЕОН. Рассмотрены особенности препроцессинга сейсмических записей, выделения регулярных волн, математического моделирования земной коры и телесеismicкой томографии. Отмечена лидирующая роль Центра ГЕОН в проведении полевых работ, цифровой обработке и интерпретации данных многоволнового ГСЗ и МОВЗ. Ключевые слова: обработка данных ГСЗ и МОВЗ, сейсмические скорости P и S-волн, моделирование земной коры, телесеismicкая томография.

Ganzha O.Yu.¹, Kukhmazov S.U.², Rakitov V.A.³, Chernyshev Yu.G.³ (1 — Shirshov Oceanology Institute RAS, 2 — Orgenergostroy Institute, 3 — GEON Centre-Branch of VNIIGeofizika)

DIGITAL PROCESSING SPECIFICITY OF THE BIG EXPLOSIONS AND EARTHQUAKES SEISMIC RECORDS ON REGIONAL TRANSECTS USING DSS AND MCWE METHODS

The main stages of digital data processing of deep seismic surveys on reference and regional profiles of the GEON Center are presented. The specificity of preprocessing of seismic records, allocation of regular waves, mathematical modeling of the earth's crust and teleseismic tomography are considered. The leading role of the GEON Center in the field work, digital processing and interpretation of multi-wave DSS and MCWE data is noted. Keywords: DSS-MCWE data processing, seismic velocity P and S-waves, earth crust modeling method, teleseismic tomography.

В период с 1971 по 1995 г. Специальная региональная геофизическая экспедиция (с 1991 г. и далее — Центр ГЕОН) в рамках Государственной программы Министерства геологии СССР по созданию опорной сети геотраверсов выполнила свыше 60 тыс. пог. км многоволновых сейсмических исследований методами ГСЗ и МОВЗ вдоль длинных опорных профилей, направленных как на решение фундаментальных задач строения земной коры и верхней мантии, так и на минерагеническое прогнозирование (рис. 1). Основные результаты региональных исследований опубликованы в работах [1, 8].

После катастрофического Спитакского землетрясения 1988 г. Центром ГЕОН совместно с другими организациями (ООО «Северо-Запад», ООО «Центр ЭМИ», Институт КНИИГиМС) было начато изучение особенностей строения земной коры сейсмоактивных районов России методами обменных волн землетрясений (МОВЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ) вдоль региональных профилей с целью разработки методики прогноза землетрясений. Работы проводились в рамках Постановления Правительства Российской Федерации от 11.05.1993 г. № 444 «О Федеральной системе сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений» и в соответствии с Методическими рекомендациями «Изучение глубинного строения сейсмоопасных зон методами разведочной геофизики» (ВНИИГеофизика, 1988). С 1999 по 2005 г. Центр ГЕОН являлся головной организацией Министерства природных ресурсов России (МПР России) по этому направлению.

Глубинные сейсмические исследования выполнялись по разработанной в Центре ГЕОН принципиально новой методике многоволнового глубинного сейсмического профилирования, основные особенности которой заключались в следующем [1]:

1. Использование при работах ГСЗ помимо базовых источников упругих колебаний химических взрывов мощностью до 4–5 т в тротиловом эквиваленте, размещенных вдоль профиля с интервалом 40–100 км, также и мирных ядерных взрывов (до 1989 г.) с расстоянием между ними 600–900 км. Шаг между пунктами дискретных наблюдений составлял 6–10 км (с 1991 г. — около 3 км). Это позволило создать две системы встречных и нагоняющих годографов — одну с длиной до 250–300 км, другую — до 1500–3500 км, что обеспечило изучение строения земной коры и верхней мантии до глубины 800 км. Начиная с 1974 г. с применением аппаратуры непрерывного действия стали регистрироваться телесеismicкие события с обработкой их записей по технологии МОВЗ и телесеismicкой томографии.

2. В обязательном порядке регистрировались три компоненты смещения почвы (Z-вертикальная и X, Y-горизонтальные, в т.ч. радиальная и тангенциальная) и выполнялась совместная обработка и интерпретация широкого класса волн: продольных (слаборефрагированных и отраженных), поперечных (слаборефрагированных и отраженных), обменных (PS и SP) сейсмических волн. Поскольку соотношение интенсивностей монотипных волн, имеющих одинаковые пути пробега, при ядерных взрывах в полтора-два раза выше, чем у химических, то это повышает надежность их выделения и корреляции, особенно поперечных волн.

3. С самого начала наблюдений аналоговые записи взрывов и землетрясений преобразовывались в циф-