Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,
1987, т. 111

УДК 550.835 + 850.84 + 553.41

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ НА ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСАХ НЕЙТРОНОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ, ТИПИЗАЦИИ И ОЦЕНКЕ ЗОЛОТОСЕРЕБРЯНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ

П.А.ВАГАНОВ

Научно-технический прогресс в области геохимических поисков месторождений полезных ископаемых должен обеспечить переход к принципиально новому типу конечных результатов этих работ – выдаче достоверных количественных оценок масштабов ожидаемой рудоносности. Проблема количественного прогнозирования сложна и включает ряд аспектов. Один из них связан с повышением требований к определению или уточнению кларков, региональных и локальных, породных и возрастных. Помимо кларкового метода количественного прогнозирования важное значение имеют регрессионный (идентификационный), классификационный и корреляционный методы [2].

Решение многоплановых задач количественного прогнозирования рудоносности, а также типизации рудных объектов неотделимо от совершенствования путей и средств надежного определения широкого круга химических элементов в обширных диапазонах содержаний, начиная с докларковых уровней. Большими возможностями в этом отношении обладает ядерно-физический метод нейтронной активации, использующий мощные потоки нейтронов современных ядерных реакторов. К числу достоинств этого метода относится способность вести прямые, инструментальные, высокочувствительные и прецизионные определения многих элементов из одной и той же навески.

Особую актуальность многоэлементный нейтронно-активационный анализ приобретает при количественном прогнозировании и типизации золотосеребряных проявлений. Неоднократно отмечалось, что развитие методик геохимических поисков золотосеребряного оруденения должно сопровождаться расширением спектра определяемых элементов, а также их дифференцированным использованием (см., например, [4]). Рассматривая вопрос об элементах, выступающих индикаторами золота, Р.Бойл пишет, что их число, в общем случае, достигает полусотни [7]. При этом необходимо учитывать индикаторную роль элементов с достаточно низкими кларками. В.Л.Барсуков, С.В.Григорян и Л.Н.Овчинников, разбирая особенности зональности геохимических ореолов гидротермальных месторождений, указывают, что до сих пор остается практически неизученным индикаторное значение многих элементов. В связи с этим рекомендуется исследовать поведение в ореолах элементов с низкими кларками (лантаноидов, селена, цезия, тантала и др.) [1]. Важность для решения

поисковых задач одновременного определения максимального числа элементов подчеркивается А.П.Солововым [5].

Стремление к максимальному расширению круга определяемых элементов безусловно оправдано. Действительно, выполненные в последние годы исследования дали новые подтверждения тезису о том, что в процессе рудообразования участвуют все химические элементы, одни – в больших масштабах, с образованием рудных тел, другие – в меньших масштабах, с рассеянием во вмещающих породах [6].

Нейтронно-активационные исследования геохимических особенностей золотосеребряных проявлений, проводимые в Ленинградском университете, опираются на определение в анализируемых породах и минералах химических элементов, представляющих все группы и почти все подгруппы Периодической системы элементов Д.И.Менделеева:

группа I – Au, Ag, Na, Rb, Cs;
группа II Sr, Ba, Zn, Cd, Hg;
группа III – La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Tm, Yb, Lu, Th, U, Sc, Tn;
группа IУ – Zr, Hf;
группа У – Ta, As, Sb;
группа УI – Cr, Mo, W, Se, Te;
группа УII – Re, Br;
группа УIII Fe, Co, Ni, Ir.

Расширение спектра одновременно определяемых элементов достигается облучением образцов горных пород и минералов высокими интегральными потоками (флюенсами) нейтронов. Оптимальное значение полного флюенса (суммы потоков тепловых и надтепловых нейтронов) оказывается близкими к 10^{19} $см^{-2}$; при этом возможно привлечение для анализа большого числа ядерных переходов между уровнями возбуждения образующихся нуклидов, включая нуклиды с низкими кларками. Вместе с тем указанная величина флюенса не приводит к чрезмерной активности облученных образцов и к существенному росту роли негативных для активационного анализа факторов, например, вкладу интерферирующих реакций, эффекту выгорания нуклидов и т.п.

Повышение селективности многоэлементного нейтронно-активационного анализа при изучении золотосеребряных проявлений обеспечивается использованием при облучении кадмиевых фильтров, поглощающих большую часть тепловых нейтронов (известно, что реакции радиационного захвата нейтронов ядрами Au, Ag и многих других элементов с низкими кларками характеризуются наличием резонансов при энергии нейтронов от 0,5 до 100 эВ). При нейтронно-активационном исследовании пород и минералов, представляющих золотосеребряные проявления, оптимальное соотношение между потоками тепловых и надтепловых нейтронов в месте облучения образцов – около 10:1.

Гамма-спектры образцов, активированных большими нейтронными флюенсами, могут насчитывать сотни линий. Для измерения таких спектров необходима аппаратура с высокой разрешающей способностью по энергии регистрирующего излучения. Целесообразно разделение измеряемых спектров на диапазо-

ии 10-500 и 300-2000 кэВ, в соответствии с чем применяются два блока детектирования.

Активация при больших флюенсах нейтронов и измерения в условиях высокого энергетического разрешения позволяют использовать для определения золота, серебра и индикаторных элементов не одну, а две или три аналитические линии. Так, измерение активности нуклида ^{198}Au проводится по гамма-линии с энергией 411,8 кэВ и по линии рентгеновского излучения ртути, сопровождающего распад ядер ^{198}Au; измерение активности нуклида ^{110m}Ag - по гамма-линиям с энергией 657,6 и 937,4 кэВ; определение сурьмы - по излучению двух образующихся радионуклидов (^{122}Sb, ^{124}Sb) и т.д.

Оптимизация условий облучения нейтронами и измерений наведенной активности привела к существенному улучшению метрологических параметров нейтронно-активационного анализа в его инструментальном варианте. Пределы обнаружения большинства определяемых элементов значительно ниже кларков элементов в осадочных породах (предел обнаружения золота и серебра соответственно 0,002 и 0,09 г/т). Снижение пределов обнаружения элементов в нейтронно-активационном методе, применяемом при изучении золотосеребряных проявлений, прямо связано с увеличением глубинности исследований. Л.Н.Овчинников, рассматривая условия, определяющие глубинность геохимических поисков рудных месторождений, отмечает, что непосредственное повышение чувствительности анализа с автоматическим уменьшением обнаруживаемого минимально аномального содержания элементов-индикаторов является первым по значимости приемом усиления сигналов контрастности исследуемой зональности, ведущим к увеличению познаваемых размеров ореолов вокруг рудных тел [3].

Точность определений в нейтронно-активационном анализе с использованием высоких флюенсов повышается прежде всего за счет существенного снижения статистической погрешности измерения количества импульсов в пиках аналитических линий. Важным фактором повышения точности явилось применение комплекса многоэлементных геохимических стандартов в качестве внешних эталонов и методики внутренних стандартов (ими служат радионуклиды с точно установленными ядерно-физическими характеристиками). Достигнутые значения запаса точности удовлетворяют требованиям, предъявляемым к анализу I и II категорий в классификации аналитических методов.

Улучшение метрологических параметров многоэлементного нейтронно-активационного анализа позволяет детально исследовать не только процессы концентрирования золота, серебра и их спутников, но также и процессы рассеяния этих элементов. При изучении золотосеребряных проявлений, локализованных в углеродистых терригенных отложениях, были установлены различия в характеристиках геохимического фона, проявляющиеся в результате сравнения отложений этого типа, залегающих в разных регионах. Одновременно определялась геохимическая специализация основных литологических разновидностей вмещающих пород: песчаников, алевролитов и сланцев. Кроме того, были получены сведения о распределении фоновых содержаний золота, серебра и их спутников между первично-осадочными сульфидными минералами, органическим веществом и породообразующими минералами.

Получаемые с помощью усовершенствованного нейтронноактивационного метода данные представляют собой надежную базу для многомерного статистического анализа и выявления устойчивых корреляционных связей золота и серебра с другими элементами. Межэлементные связи устанавливаются в широких диапазонах содержаний элементов, начиная с кларков; при этом, вследствие малости пределов обнаружения устраняются ложные корреляции, нередко проявляющиеся при использовании аналитических методов с недостаточной чувствительностью.

Стадийный характер процессов рудообразования обусловливает сложность статистических связей золота и серебра с сопутствующими элементами, формирующими потоки рассеяния и ореолы вокруг рудных тел. Межэлементные связи могут меняться от ранних стадий процесса к более поздним, что приводит к усложнению геохимической зональности рудных объектов, к непостоянству корреляции между благородными металлами и индикаторными элементами, фиксируемому при переходе от одних зон к другим в пределах рассматриваемого месторождения или рудного поля.

На примере исследования с привлечением данных многоэлементного нейтронно-активационного анализа ряда эталонных объектов с золотосеребряными проявлениями в углеродистых терригенных толщах устанавливается эволюция связей золота и серебра с другими элементами, характеризующая переход от наиболее высокотемпературных образований, мусковитизированных пород (серицитолитов), к альбитизированным породам и далее к низкотемпературным аргиллизитам.

К серицитолитам приурочена золотосульфидная минерализация, где основным концентратором золота выступает тонкокристаллический пирит первой продуктивной генерации. Статистическая обработка данных нейтронно-активационного исследования наиболее интенсивно изменявшихся в процессе серицитизации пород - сланцев - показала, что золоту свойственна тесная корреляция с As, Sb и Ag - примесными элементами в пиритах, а также с рядом литофильных элементов (K, Rb, Cs, Sc, Cr, La и Th), входящих в кристаллическую решетку новообразованного мусковита. С Si, Na, Ca и Eu золото проявляет антикорреляцию, что отражает растворение плагиоклазов исходных пород под действием гидротерм и вынос указанных элементов из зоны реакции.

Для сланцев, преобразованных в результате альбитизации, характерно существенное ослабление статистических связей золота с As, Sb и Ag. Это указывает на снижение роли сульфидной минерализации в концентрации золота и серебра. Действительно, согласно данным нейтронно-активационного анализа, содержание Au в пиритах второй генерации, кристаллизовавшихся на стадии альбитизации, на два порядка меньше, чем в пиритах первой генерации. С элементами, присутствующими в мусковите, золото практически не коррелирует, но оно проявляет тесную статистическую связь с Na и Sr, входящими в состав альбита.

Связь между Au и Ag в зоне альбитизации, будучи ослабленной, все же частично сохраняется, что объясняется совместным нахождением обоих ме-

таллов в дисперсных выделениях электрума. Самородная форма осаждения Au и Ag обусловливает сокращение статистических связей этих элементов с другими элементами, прежде всего с As и Sb . Наряду с электрумом, на стадии альбитизации образуются сульфосоли, в которых концентрируется значительное количество серебра, что отражается в статистических связях Ag и Sb. Следует отметить, что для альбитизированных пород рассматриваемых объектов характерен вынос Rb , Cs , легких лантаноидов, Th , а также элементов группы железа (Co, Ni). Помимо снижения корреляции в группе рудных элементов (Au, Ag, As, Sb) в зоне альбитизации ослаблены статистические связи между Th и U и в группе редкоземельных элементов.

Наиболее поздний этап эволюции рудно-метасоматического процесса, развивавшегося в рассматриваемых образованиях, - стадия аргиллитизации. Высокая кислотность низкотемпературных гидротермальных растворов придала этой стадии характер кислотного выщелачивания. Часть минералов предшествующих стадий (включая слюды и сульфиды) подверглась разрушению, в результате чего многие элементы оказались вынесенными из зоны реакции. Ведущим минералом аргиллизитов является каолинит; сульфиды и сульфосоли в значительной степени замещены сульфатами. Для стадии аргиллизации типична самородная форма выделения Au и Ag , а также образование кераргирита. Мышьяк и сурьма осаждаются в виде собственных минералов. Происходит дальнейшее нарушение корреляционных связей не только в пределах группы рудных элементов, но также между торием и ураном, между лантоноидами.

С точки зрения математической статистики, данные многоэлементного метода нейтронной активации, характеризующие исследуемую пробу горной породы широким набором геохимических признаков, обеспечивают четкую локализацию фигуративной точки, представляющей эту пробу, в многомерном пространстве. Это, в свою очередь, предопределяет успех факторного анализа данных нейтронно-активационного метода. Многомерная статистическая обработка результатов нейтронно-активационного исследования редкоэлементного состава метасоматитов, сформированных на различных этапах преобразования углеродистых терригенных пород, позволила получить факторные диаграммы, которые можно рассматривать в качестве обобщенных геохимических характеристик рассматриваемых объектов. Количество проб, входивших в анализировавшиеся выборки, варьировало от 20 до 50; на долю двух первых факторов (главных компонент) в ранжированном по значениям дисперсии ряду многокомпонентных признаков проб приходилось от 40 до 60 % от суммарной дисперсии.

Факторные диаграммы эталонных объектов, в качестве которых принимались участки развития околорудных метасоматитов с золотосеребряными проявлениями, сформированных на различных этапах рудогенеза в углеродистых терригенных отложениях, обладают высокой устойчивостью. Факторный анализ результатов нейтронно-активационного исследования бороздовых проб, отобранных на разных разведочных горизонтах, а также проб керна скважин с различных глубин показал, что взаимное расположение элементов на диаграммах эталонного объекта, построенный в координатах двух первых факторов, сохраняет все основные особенности, характеризующие соответствующую стадию рудо-

образующего процесса. При этом первая главная компонента, как правило, отражает закономерности распределения элементов, которые связаны с особенностями исходных вмещающих пород. Значения же второй главной компоненты характеризуют признаки, обусловленные процессом гидротермально-метасоматических изменений пород. На сравнении факторных диаграмм участков, являющихся объектами поисково-разведочных работ, с факторными диаграммами эталонных участков базируется методика типизации объектов, проводится экспрессное определение их положения в рудно-метасоматической зональности.

Широкий спектр выявляемых на основе использования нейтронно-активационного анализа элементов - индикаторов золотого и золотосеребряного оруденения обеспечивает применение методики накопления признаков (сигналов) путем суммирования или перемножения (мультипликации) содержаний элементов. Согласно А.П.Соловову, рудные литогеохимические аномалии неизменно являются комплексными, и мультипликация содержаний составляющих аномалию элементов ведет к усилению ее контрастности. Особую роль эффект мультипликации играет в случае слабых аномалий [5]. Ряд примеров успешного использования для поисков мультипликативных коэффициентов геохимической зональности приводят В.Л.Барсуков, С.В.Григорян и Л.Н.Овчинников [I]. Л.Н.Овчинников отмечает, что усиление сигналов контрастности геохимической зональности путем суммирования или перемножения содержаний элементов непосредственно отражается в увеличении глубинности геохимических поисков [3].

Исследование с помощью многоэлементного нейтронно-активационного анализа околорудных метасоматитов, сформированных в углеродистых терригенных отложениях, позволило разработать ряд количественных геохимических критериев выделения и типизации золотосеребряных проявлений, включающих мультипликативные параметры, дифференцированные в соответствии с основными этапами преобразований вмещающих пород. Так, мультипликативные параметры выделения участков с золотосульфидной минерализацией, приуроченной к зоне серицитизации (мусковитизации), определяются следующим образом:

$$K_1 = As \cdot Sb / As_0 \cdot Sb_0,$$

$$K_2 = Cr \cdot Co \cdot Ni / Cr_0 \cdot Co_0 \cdot Ni_0,$$

$$K_3 = K \cdot Na_0 \cdot Rb \cdot Cs / K_0 \cdot Na \cdot Rb_0 \cdot Cs_0,$$

(здесь индекс "0" относится к содержаниям элементов в исходных породах). Для изучавшихся объектов $\bar{K}_1 = 630$, $\bar{K}_2 = II$, $\bar{K}_3 = I9$, следовательно, $K_1K_2K_3 > I0^5$. Один из мультипликативных параметров выделения участков золотосеребряной минерализации, приуроченной к зоне альбитизации определяется выражением

$$K_4 = Sr \cdot Zn \cdot Ag / Sr_0 \cdot Zn_0 \cdot Ag_0$$

(напомним, что в этом случае ни As, ни Sb не могут считаться надежными индикаторами оруденения). В случае изучавшихся объектов $\bar{K}_4 = 600$.

Использование мультипликативных геохимических параметров, базирующихся на данных многоэлементного нейтронно-активационного анализа, позволяет выявлять слабоконтрастные аномалии, увеличивает глубинность поисков, повышает надежность типизации золотосеребряных проявлений и достоверность необходимых прогнозных оценок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барсуков В.Л., Григорян С.В., Овчинников Л.Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., Наука, 1981. 317 с.

2. Неженский И.А., Рундквист Д.В. Основные методы оценки прогнозных ресурсов территорий. – В кн.: Геохимические методы при поисках скрытого оруденения. – М., Наука, 1984, с. 146–162.

3. Овчинников Л.Н. Геолого-геохимические условия, определяющие глубинность геохимических поисков глубокозалегающих рудных месторождений. – В кн.: Геохимические методы поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1980, с. 12–22.

4. Росляков Н.А. Геохимия золота в зоне гипергенеза. Новосибирск, Наука, 1981. 238 с.

5. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М., Наука, 1985. 294 с.

6. Таусон Л.В. Петролого-геохимические принципы оценки рудоносности больших территорий. – В кн.: Геохимические методы поисков в северных районах Сибири. Новосибирск, Наука, 1984, с. 4–11.

7. Boyle R.W. The geochemistry of gold and its deposits. – Ottawa: Geol. Survey of Canada, 1979. 584 p.