

ГЕОХИМИЯ СЕРЕБРА В ПЕРМОТРИАСОВЫХ ТРАППАХ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**А.Я. Медведев, А.И. Альмухамедов***Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

Приведены первые данные по содержанию серебра в вулканитах Западно-Сибирской плиты и существенно дополнены данные о базальтах Сибирской платформы. Содержания серебра во всех исследованных породах не зависят от процессов фракционирования исходных расплавов, процессов контаминации вмещающих пород и составляют в среднем от 0.07 до 0.10 г/т. Повышенные содержания серебра могут быть связаны только с процессами сульфидообразования.

*Вулканиты, серебро, Сибирская платформа, Западно-Сибирская плита.***GEOCHEMISTRY OF SILVER IN PERMO-TRIASSIC TRAPS OF THE SIBERIAN PLATFORM****A.Ya. Medvedev and A.I. Al'mukhamedov**

The first data on the silver content in volcanics of the West Siberian Plate are presented, and data on basalts of the Siberian Platform are supplemented. The silver contents in all studied rocks do not depend on the fractionation of initial melts and contamination of the host rocks and average 0.07–0.10 ppm. The high silver contents can be associated only with sulfide formation.

Volcanics, silver, Siberian Platform, West Siberian Plate

Серебро как металл известно человечеству с давних пор. Оно менее оксифильно, более халькофильно и более сидерофильно, чем медь, поэтому серебро в значительной мере было захвачено металлической и сульфидной фазами при образовании земного ядра [Рябчиков и др., 1999]. Геохимия серебра в изверженных породах остается слабоизученной. Сложность изучения геохимии серебра, особенно на кларковом уровне, связана с тем, что оно находится в различных формах в минеральных фазах, а также с проблемами анализа. Данные, приводимые в некоторых работах, в основном касаются металлогении и концентрации серебра в рудных месторождениях и не рассматривают его поведения на различных этапах развития магматических систем [Орлова и др., 1983; Сидоров и др., 1989; Рябчиков и др., 1999; Григорьев, 2007; и др.]. Ранее нами было рассмотрено распределение серебра в покровных базальтах платформ [Медведев, Альмухамедов, 1995]. За прошедшее время авторами получено большое количество новых данных по базальтам Сибирской платформы. Впервые проведено определение серебра в вулканитах Западно-Сибирской плиты. Точки отбора проб приведены на рис. 1. В данной работе рассмотрена геохимия серебра в пермотриасовых вулканитах Восточной и Западной Сибири. Выбор объекта обусловлен следующими факторами. Установлено, что погрешенные вулканиты Западно-Сибирской плиты и выходящие на дневную поверхность эффузивы Сибирской платформы образуют крупнейшую в мире изверженную провинцию. По крайней мере, в кембрии эти регионы составляли единое целое [Конторович и др., 2008; Бочкарев и др., 2010]. Площадь распространения пермотриасовых вулканитов на Северо-Азиатском кратоне составляет более $2.6 \cdot 10^6$ км². Объем излившихся на поверхность вулканитов приблизительно оценивается $2.3 \cdot 10^6$ км³. Интерес к этой крупнейшей провинции обусловлен несколькими факторами. Во-первых, по последним данным, вулканизм проявлялся близкоодновременным на всей территории Северо-Азиатского кратона [Reichow et al., 2009]. Во-вторых, во время масштабного проявления вулканизма (~ 251 млн лет) произошло массовое вымирание живых организмов, что, вероятно, связано как раз с излиянием гигантских объемов магмы. И, наконец, в-третьих, с трапповой формацией Сибирской платформы связаны уникальные медно-никелевые месторождения, а с Западно-Сибирской плитой не менее уникальные углеводородные залежи.

Ранее было доказано, что вулканизм обоих регионов был внутриплитным [Медведев и др., 2003; Альмухамедов и др., 2004] и связан с влиянием суперплюма или двух плюмов [Добрецов, 1997]. Базиты траппов и рифтовых зон имеют повышенные содержания некогерентных элементов, а по химизму близки к базитам океанических плато [Симонов и др., 2004]. При общем диаметре Сибирского суперплюма 2.0—3.5 тыс. км [Добрецов, 2010], вероятно, существовали две проекции головок этого суперплюма. Одна из них находилась под центральной частью Западно-Сибирской плиты и вызвала массовый рифтогенез, а вторая, возможно, располагалась под западной частью Енисейско-Хатангского прогиба, где предполагается рифтогенная зона.

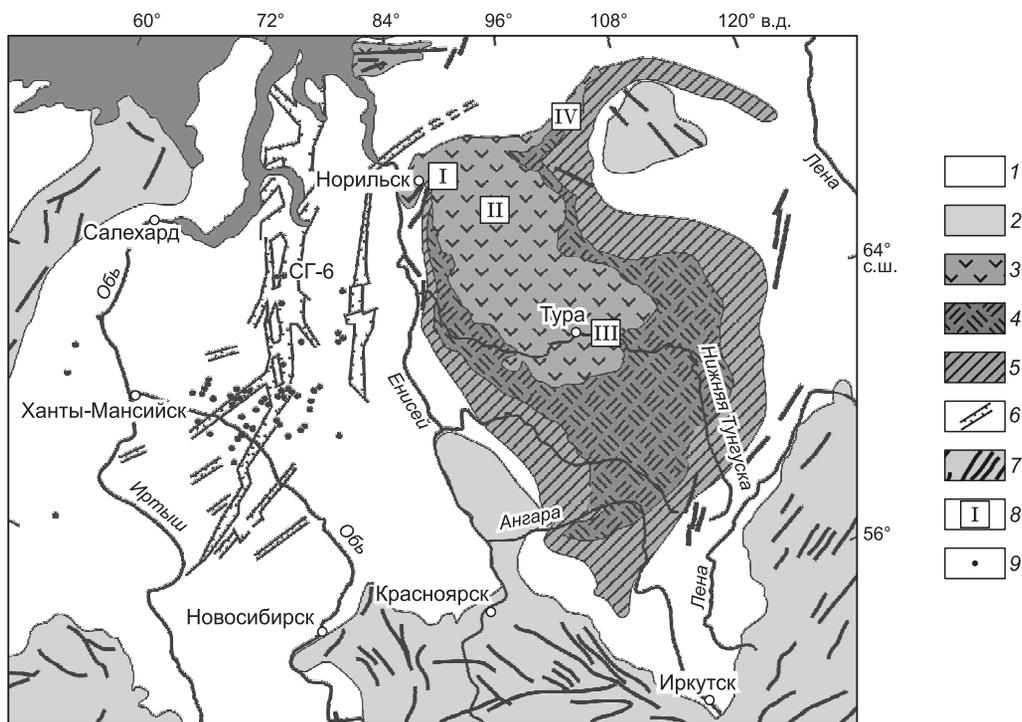


Рис. 1. Схема распространения пермотриасовых траппов Сибирской платформы и палеорифтовых структур Западно-Сибирской плиты и районов исследования. Масштаб 1:20 000 000.

1 — осадочный чехол фанерозоя, 2 — складчатые пояса и выступы докембрийского фундамента, 3 — эффузивы, 4 — базальтовые туфы и туффиты, 5 — области распространения интрузивных траппов, 6 — проекции на поверхность выявленных и прогнозируемых рифтовых структур доюрского основания Западно-Сибирской плиты, 7 — основные тектонические нарушения, 8 — полигоны детальных исследований вулканогенной толщи Тунгусской синеклизы, 9 — местоположения скважин на территории Западной Сибири, вскрывших вулканический комплекс триаса.

Магматизм Западной и Восточной Сибири имеет много общих черт. В обоих регионах преобладают базальтоиды. Однако на территории Тунгусской синеклизы выявляется эволюция вещественного состава во времени и пространстве. Нами выделены три типа разрезов вулканических пород — примитивные (монотонные), нормальные (с периодическим изменением состава) и аномальные (типа сэндвича) [Шарапов и др., 2003; Альмухамедов и др., 2004]. Первые из них являются преобладающими для ареала распространения базальтов и представлены преимущественно низкокальциевыми толеитами. Для вторых характерно преобладание в нижних стратиграфических горизонтах дифференцированной серии щелочных и субщелочных разновидностей пород. Для третьих отмечена незакономерная перемежаемость пород субщелочной (щелочной) и толеитовой серий. Исследование пространственного распределения различных типов пород показало, что нормальные и аномальные разрезы характерны лишь для северных и северо-западных бортовых окраин Тунгусской синеклизы и приурочены к плечевым частям палеорифтовых структур, тогда как примитивные разрезы занимают большую часть исследованной территории. На основании всего вышесказанного в данном регионе выделены два сближенных этапа магматической активности — инициальный (рифтогенный) и конечный (собственно покровный или внерифтовый). Статистически рифтогенный этап несколько опережает покровный (нормальные разрезы), однако изливание магм различной щелочности в ряде случаев может происходить практически одновременно (аномальные разрезы). Таким образом, все вулканические породы Тунгусской синеклизы представлены основными разностями различной степени щелочности и основности.

На территории Западной Сибири дело обстоит несколько иначе. Здесь обнаружены вулканы широкого спектра по своему составу: от базальтов до риолитов, включая щелочные породы — трахибазальты и фонолиты [Медведев и др., 2003]. Считается, что все пермотриасовые вулканы Западной Сибири являются производными рифтогенного магматизма. Это хорошо согласуется с наличием в доюрском фундаменте грандиозной системы рифтовых структур, которые завершили свое развитие в триасе [Сурков и др., 2003]. Выяснено, что все вулканы Западной Сибири приурочены либо к рифтовым зонам, либо к межрифтовым поднятиям и все относятся к рифтогенному этапу. Еще раз отметим, что, несмотря

Содержание серебра в разновидностях вулканитов Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты

Разновидность пород	Количество образцов	Содержание, г/т		
		min	max	среднее
Сибирская платформа				
Толетовые базальты	360	0.01	0.31	0.07
Субщелочные базальты	72	0.02	0.26	0.08
Пикритобазальты	20	0.05	0.25	0.10
Базальтоиды рифтогенного этапа	93	0.02	0.26	0.09
Базальтоиды покровного этапа	369	0.01	0.31	0.07
Западная Сибирь				
Толетовые базальты	20	0.03	0.30	0.07
Субщелочные базальты	38	0.03	0.24	0.06
Трахибазальты	6	0.04	0.15	0.09
Фонолиты	5	0.04	0.09	0.06
Риолиты и риодациты	17	0.04	0.16	0.10
Базальтоиды рифтогенного этапа	58	0.03	0.30	0.07

на большое разнообразие вулканических пород, преобладают базальты. К настоящему времени, какой-либо зональности в распределении вулканитов на территории Западной Сибири не выявлено. Это связано с недостаточностью фактического материала.

Представляется чрезвычайно важным рассмотреть содержание серебра в однотипных породах рифтогенного и покровного этапов обоих регионов.

В связи с тем, что в некоторых пробах базальтов Норильского района, которые содержат видимые сульфидные минералы, отмечено содержание серебра до 86 г/т, в выборку включены пробы без видимых сульфидов. При этом в пробах с максимальным количеством серебра, как правило, отмечается и

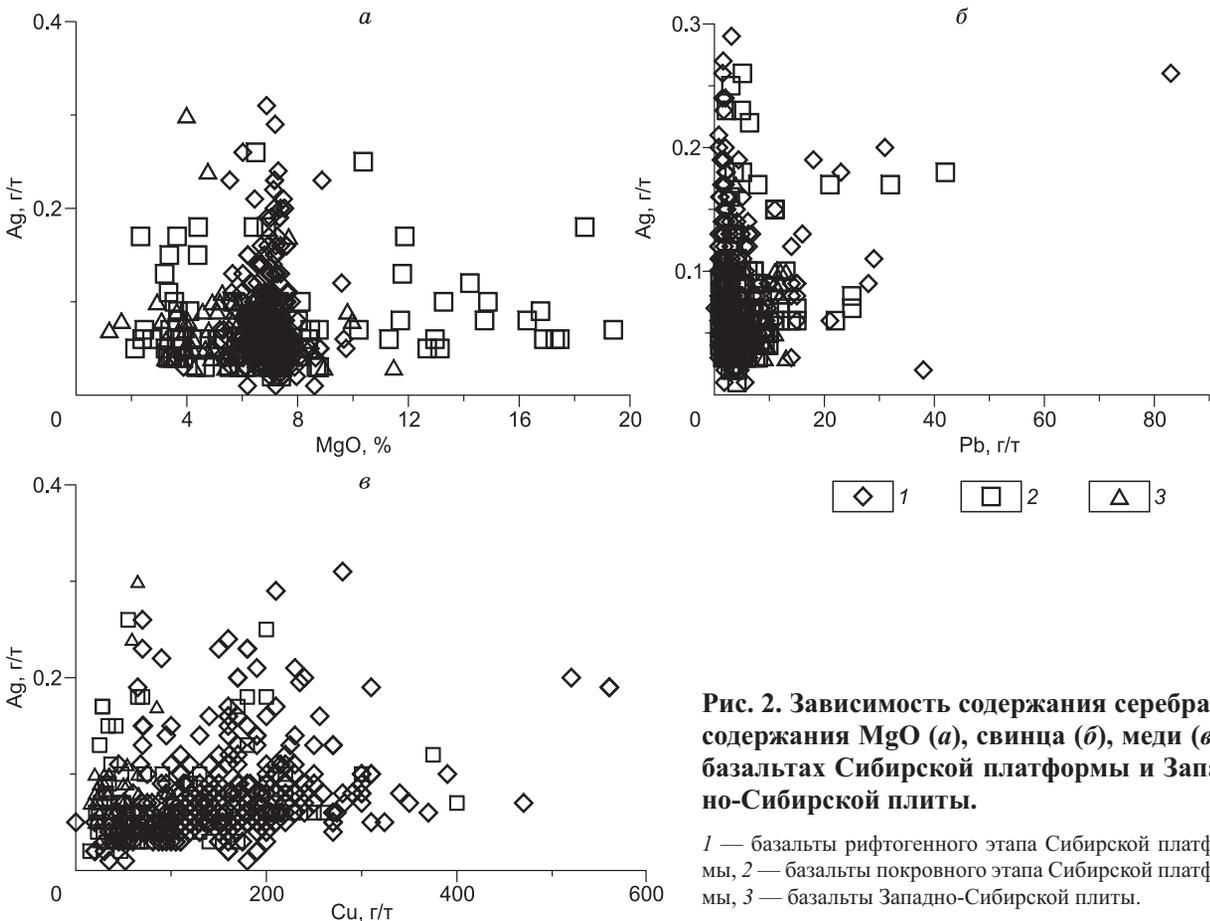


Рис. 2. Зависимость содержания серебра от содержания MgO (а), свинца (б), меди (в) в базальтах Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты.

1 — базальты рифтогенного этапа Сибирской платформы, 2 — базальты покровного этапа Сибирской платформы, 3 — базальты Западно-Сибирской плиты.

максимальное содержание свинца. Вероятно, здесь присутствуют зерна галенита. Чтобы исключить влияние сульфидов максимальное значение содержания серебра в выборке принято 0.31 г/т.

Содержание серебра определялось атомно-эмиссионным анализом (АЭА) с использованием дугового разряда [Смирнова и др., 1993] по специально разработанной методике [Kuznetsova et al., 2007]. Данная методика позволяет получать результаты хорошо сходимые с данными метода ICP-MS с пределом обнаружения 0.01 г/т.

Данные о концентрации серебра в разных породах приведены в таблице. Из рассмотрения таблицы можно сделать вывод, что, несмотря на существенный разброс значений в каждом типе пород, средние содержания достаточно близки между собой и составляют 0.06—0.10 г/т. В большинстве типов вулканитов обоих регионов содержание серебра ниже кларка для базитов (по Виноградову). Для Сибирской платформы наблюдаются несколько повышенные концентрации серебра в породах рифтогенного этапа. Относительно Западной Сибири такой вывод сделать невозможно, так как все изученные породы относятся к рифтогенному этапу. В базальтах обоих регионов не наблюдается различия в толеитовых рядах относительно субщелочных. При этом следует отметить, что концентрации серебра в породах Сибирской платформы несколько выше. Возможно, здесь играют роль региональные различия исходных расплавов или металлогеническая специализация Сибирской платформы.

Нами была предпринята попытка найти корреляционные зависимости между содержанием серебра и петрогенных и редких элементов в вулканитах Сибирской платформы и Западной Сибири. Однако эта попытка не увенчалась успехом. На рис. 2, а показана связь содержаний MgO и серебра в общей выборке проб. Установлено, что изменение магнезиальности пород, отвечающее за степень фракционирования родоначальных магм, практически не влияет на изменение концентраций серебра. Таким же образом, как показано выше, не наблюдается корреляционной зависимости между серебром и щелочностью пород.

Несмотря на то, что серебро во всех типах месторождений тесно связано со свинцом [Антонов, 2009], для вулканитов это не характерно. Рассмотрев всю выборку по исследованным регионам, какой-либо закономерности связи серебра со свинцом не отмечено (см. рис. 2, б). Единственным элементом, с которым наблюдаются корреляционные связи серебра, является медь (см. рис. 2, в).

Распределение серебра по площади рассмотрено только для Сибирской платформы. Для территории Западной Сибири сделать подобное не представляется возможным из-за недостатка данных. Средние содержания серебра по свитам разных районов Сибирской платформы приведены на рис. 3, видно, что существенной разницы в большинстве районов не наблюдается. Несколько повышенные содержания элемента отмечаются в Норильском районе, максимальные концентрации серебра здесь приурочены к границам второго и четвертого циклов. Но пока не представляется возможным определить, чем это вызвано. Возможно, часть вулканитов Норильского района несет отпечаток влияния Cu-Ni-PGE рудоносных интрузий, широко развитых в этом районе.

Анализ всей имеющейся информации позволяет сделать следующие выводы.

Известно, что многообразие пород вулканогенных формаций изученных регионов определяется многими факторами. Основным фактором является фракционирование (в широком понимании этого термина) родоначальных базитовых магм, возможно, переменной щелочности [Золотухин, Альмухамедов, 1990] в очагах разной глубинности [Альмухамедов и др., 1991, 1993]. Согласно данным, приведенным выше, можно сделать вывод, что процессы магматической дифференциации не приводят к концентрированию серебра. Применительно к процессам коровой контаминации можно сделать аналогичный вывод, так как содержание Ag в кислых магматических породах и большинстве осадочных ниже по сравнению с базитами.

Показанные особенности поведения серебра связаны с трудностью вхождения Ag^+ в структуры главных породообразующих минералов по схеме изоморфизма [Нестеренко, Альмухамедов, 1973] в связи с его более выраженными халькофильными свойствами. В силу этого можно заключить, что поведение серебра в процессах эволюции магм достаточно сходно с поведением меди и золота. Ранее нами [Альмухамедов, Медведев, 1978; Миронов и др., 1978], были определены коэффициенты распределения меди и золота между сульфидными и силикатными расплавами. Вероятнее всего, величина коэффициента распределения серебра занимает положение между золотом и медью. Именно халькофильными свойствами серебра можно объяснить повышенную дисперсность его содержания и наблюдаемые «ураганные» концентрации. Это также подтверждается находками в сульфидных рудах месторождений, которые ассоциируются с базальтами северо-запада Сибирской платформы, аргентоплюмбита, серебросодержащего галенита и интерметаллических соединений серебра [Генкин и др., 1981]. Представляется чрезвычайно интересным рассмотреть процесс сульфидообразования. По данным некоторых исследователей [Zang et al., 2008; Begg et al., 2010], сульфидообразование происходит при взаимодействии «плюмовой» магмы, поднимающейся к поверхности в районах архейских кратонов, с архейской литосферой, которая обогащена Ni-Cu-PGE, при этом магма насыщается этими элементами. При наличии серосодержащих

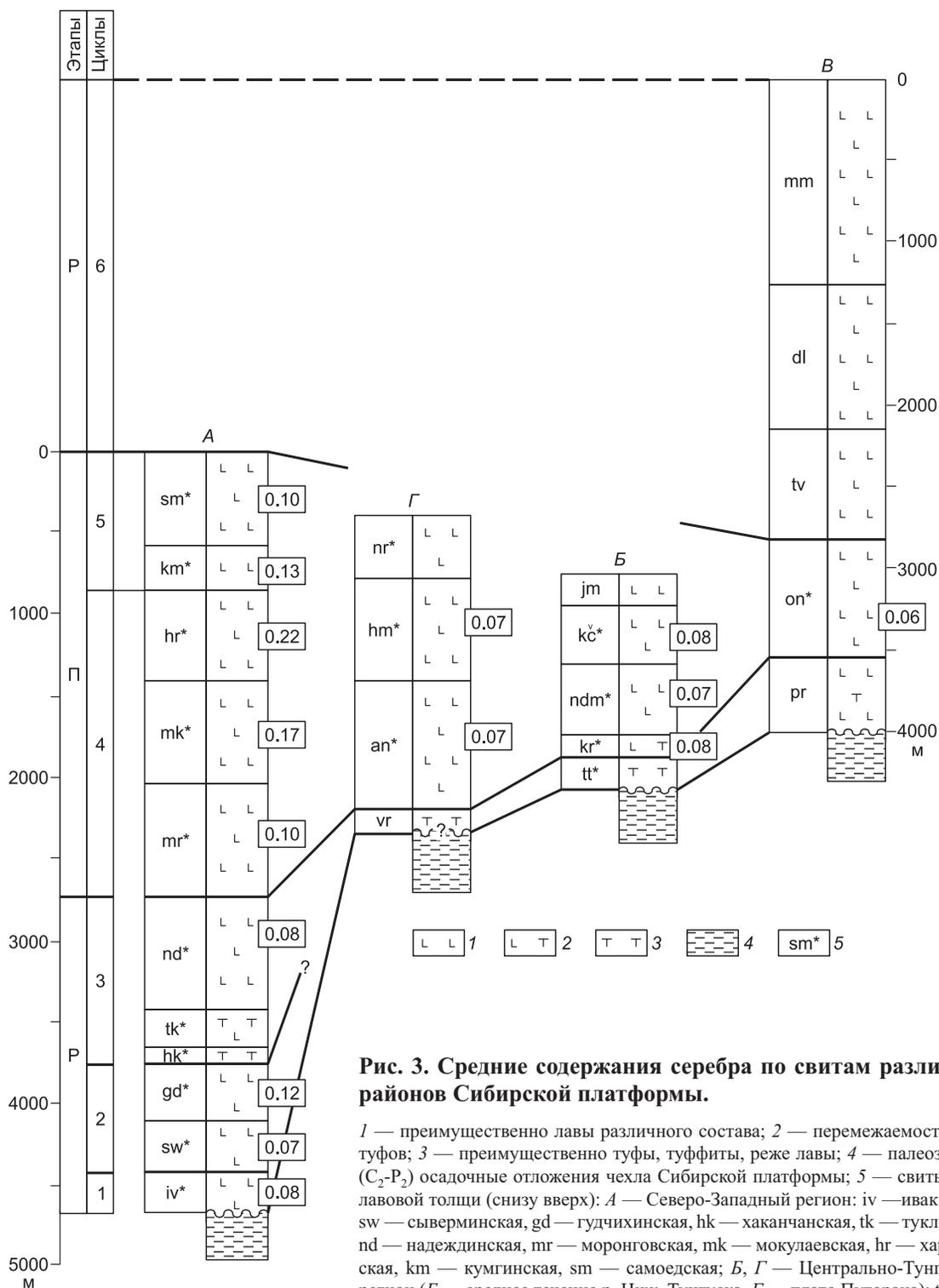


Рис. 3. Средние содержания серебра по свитам различных районов Сибирской платформы.

1 — преимущественно лавы различного состава; 2 — перемежаемость лав и туфов; 3 — преимущественно туфы, туффиты, реже лавы; 4 — палеозойские (C₂-P₂) осадочные отложения чехла Сибирской платформы; 5 — свиты туфо-лаво-вой толщи (снизу вверх): А — Северо-Западный регион: iv — ивакинская, sw — сыверминская, gd — гудчихинская, hk — хақанчанская, tk — туклонская, nd — надеждинская, mr — моронговская, mk — мокулаевская, hr — хараелахская, km — кумгинская, sm — самоедская; Б, Г — Центрально-Тунгусский регион (Б — среднее течение р. Ниж. Тунгуска, Г — плато Пutorана): tt — ту-

точанская, kr — корвунчанская, ndm — нидымская, kc* — кочечумская, jm — ямбуқанская, vr — водораздельная, an — аянская, hm — хоннамакитская, pr — нераркарская; В — Маймеча-Котуйский регион: pb — правобоярская, on* — онкучанская, tv — туванкитская, dl — дельканская, mm — маймечинская. Этапы: П — покровный, Р — рифтогенный.

фаз происходит ее сульфидизация или образование сульфидного расплава, как показано нами ранее [Альмухамедов, Медведев, 1977]. В данном случае, благодаря высоким коэффициентам распределения указанных элементов в пользу сульфидного расплава, происходит его обогащение Ni, Cu, PGE и, вероятно, Ag. На возможность такого механизма указывает положительная корреляция меди и серебра (см. рис. 2, в).

Независимо от процессов фракционирования или контаминации вмещающих пород базальтовым расплавом в нем не наблюдается накопление серебра. Не отмечается значимой разницы в содержании серебра в базальтах Сибирской платформы и вулканитах Западно-Сибирской плиты. Показано, что повышенные содержания этого элемента могут быть связаны только с процессами сульфидообразования, в которых серебро концентрируется вместе с другими халькофильными элементами.

Работа завершена при поддержке ФАНИ (госконтр. 02.740.11.0324).

ЛИТЕРАТУРА

Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. Сульфуризация — один из возможных механизмов формирования сульфидных медно-никелевых месторождений // Докл. АН СССР, 1977, т. 236, № 4, с. 965—968.

Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. Распределение халькофильных элементов между сульфидным и силикатным расплавами (по экспериментальным данным) // Докл. АН СССР, 1978, т. 240, № 2, с. 717—721.

Альмухамедов А.И., Золотухин В.В., Альмухамедов Е.А. Кайнозойские траппы Декана. 2. Геохимическая характеристика // Геология и геофизика, 1991 (10), с. 58—67.

Альмухамедов А.И., Золотухин В.В., Альмухамедов Е.А., Сандимирова Г.П., Пахольченко Ю.А. Геохимическая модель гибридизации базальтовой магмы для интрузии Тулай-Киряка (Таймыр) // Геология и геофизика, 1993 (4), с. 50—59.

Альмухамедов А.И., Медведев А.Я., Золотухин В.В. Вещественная эволюция пермотриасовых базальтов Сибирской платформы во времени и пространстве // Петрология, 2004, т. 4, с. 330—360.

Антонов А.Е. Зарубежные месторождения серебра. М., ГЕОС, 2009, 312 с.

Бочкарев В.С., Брехунцов А.М., Ларичев А.И., Машак М.С., Оленникова Е.В. О западной границе распространения сибирских траппов и их геодинамической природе // Горные Ведомости, 2010, № 11, с. 6—26.

Генкин А.Д., Дистлер В.В., Гладышев Г.Д., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л., Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Смирнов А.В., Гроховская Т.Л. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М., Наука, 1981, 234 с.

Григорьев Н.А. Распределение серебра в горных породах, представляющих верхнюю часть континентальной коры // Уральский геологический журнал, 2007, № 3, с. 35—54.

Добрецов Н.Л. Пермьотриасовый магматизм в Евразии как отражение суперплюма // Докл. РАН, 1997, т. 354, № 2, с. 220—223.

Добрецов Н.Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (6), с. 761—784.

Золотухин В.В., Альмухамедов А.И. Фракционирование и щелочность в эволюции исходных магм платформенных базитов (на примере северо-запада Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 1990 (10), с. 15—21.

Конторович А.Э., Варламов А.И., Емешев В.Г., Ефимов А.С., Клец А.Г., Комаров А.В., Которович В.А., Коровников И.В., Сараев С.В., Филиппов Ю.Ф., Варакина И.В., Глинских В.Н., Лучнина В.А., Новожилова Н.В., Пегель Т.В., Сенников Н.В., Тимохин А.В. Новый тип разреза кембрия в восточной части Западно-Сибирской плиты (по результатам бурения параметрической скважины Восток-1) // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (11), с. 1119—1128.

Медведев А.Я., Альмухамедов А.И. Геохимия серебра в покровных базальтах платформ // Докл. РАН, 1995, т. 344, № 1, с. 101—105.

Медведев А.Я., Альмухамедов А.И., Кирда Н.П. Геохимия пермьотриасовых вулканитов Западной Сибири // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (1—2), с. 86—100.

Миронов А.Г., Альмухамедов А.И., Медведев А.Я., Кренделев Ф.П. Геохимия золота в расплавах базальтового состава (по экспериментальным данным) // Геохимия, 1978, № 11, с. 1639—1652.

Нестеренко Г.В., Альмухамедов А.И. Геохимия дифференцированных траппов (Сибирская платформа). М., Наука, 1973, 198 с.

Орлова Г.П., Рябчиков И.Д., Волченкова В.А. Распределение серебра между гранитным расплавом и флюидом // Геология рудных месторождений, 1983, т. 25, № 3, с. 34—43.

Рябчиков И.Д., Орлова Г.П., Бабанский А.Д., Магазина Л.О., Цепин И.А. Халькофильные металлы в процессах магмаобразования и формирования ядра Земли // Российский журнал наук о Земле, 1999, т. 1, № 6, с. 7—15.

Сидоров А.А., Константинов М.М., Еремин Р.А. Серебро (геология, минералогия, генезис, закономерности размещения месторождений). М., Наука, 1989, 240 с.

Симонов В.А., Ковязин С.В., Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. Петрогенез базальтовых серий подводного плато Онтонг-Джава-Науру // Петрология, 2004, т. 12, № 12, с. 191—205.

Смирнова Е.В., Кузнецова А.И., Чумакова Н.Л. Атомно-эмиссионный анализ в геохимии. Новосибирск, Наука, 1993, 230 с.

Сурков В.С., Кузнецов В.Л., Латышев В.И. Глубинное строение земной коры нефтегазоносных провинций Сибири // Разведка и охрана недр, 2003, № 1, с. 6—8.

Шарапов В.Н., Васильев Ю.Р., Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. О локальной и региональной изменчивости в составе пермотриасовых эффузивных траппов Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (8), с. 741—752.

Begg G.C., Hronsky J.A.M., Arndt N.T., Griffin W.L., O'Reily S.Y., Hayward N. Lithospheric, cratonic, and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits // Econ. Geol. 2010, v. 105, № 6, p. 1057—1070.

Kuznetsova A.I., Zarubina O.V., Sklyarova O.A. Determination of trace elements (Ag, B, Ge, Mo, Sn, W, Tl) in reference samples of soils and bottom sediments by atomic emission spectrometry: a traceability and fitness-for-purpose study // Geostand. Geoanal. Res., 2007, v. 31, № 3, p. 251—259.

Reichow M.K., Pringle M.S., Al'mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., Davies C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Ingel S., Medvedev A.Ya., Mitchell C., Puchkov V.N., Safonova I.Yu., Scott R.A., Saunders A.D. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: implications for the end-Permian environmental crisis // Earth Planet. Sci. Lett., 2009, v. 277, № 1, p. 9—20.

Zhang M., O'Reily S.Y., Wang K-L., Hronsky J.A.M., Griffin W.L. Flood basalts and metallogeny: the lithospheric mantle connection // Earth Sci. Rev., 2008, v. 86, p. 145—174.

*Рекомендована к печати 15 июля 2011 г.
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию
4 февраля 2011 г.*