

Минералого-геохимические признаки метасоматических преобразований гранитов в дайках северной части Березовского рудного поля (Средний Урал)

Степанов С. Ю., Шагалов Е. С., Паламарчук Р. С., Кутырев А. В., Шарпенко Л. Н., Набиуллин Ф. М., Трошкина А. Н.

Аннотация

В работе приводятся результаты петрографического, геохимического и минералогического изучения апогранитовых метасоматитов, ассоциирующих с сульфидно-кварцевыми золоторудными жилами. Установлено, что среди всего разнообразия апогранитовых метасоматитов преобладают мономинеральные мусковитовые и кварц-мусковитовые метасоматиты. Формирование мономинеральных мусковитовых метасоматитов сопровождается накоплением W, Sc, Zr, Hf, Ga, REE, U, Th, Ta, Nb и образованием новых акцессорных минералов: монацита-(Ce), апатита, циркона, шеелита, вольфрамсодержащего рутила, уранинита, торинита, касситерита и др. Для кварц-мусковитовых метасоматитов наиболее характерно увеличение содержания, по сравнению с исходными гранитами, Pb, Bi, As, Sb, Co, Ni, Ba, In, Cd, Mo, Te, Ag, Au – элементов, входящих в золоторудную ассоциацию. Изменение содержаний названных элементов-примесей в этом типе метасоматитов обусловлено широким развитием среди акцессорных минералов галенита, блёклых руд, халькопирита и пирита. Для метасоматического преобразования гранитов, в целом, характерен вынос кремнекислоты, которая расходовалась в дальнейшем на формирование кварцевых жил. Установлено, что характер распространения разных типов метасоматитов в пределах дайкового тела напрямую влияет на характер распространения сульфидно-кварцевых жил и как следствие определяет рудоносность отдельных фрагментов дайковых тел.

Илл. 14 Табл. 5 Библ. 53

Ключевые слова:

Средний Урал, Березовское рудное поле, золоторудные месторождения, золоторудная геохимическая ассоциация, редкоземельные элементы, апогранитовые метасоматиты

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ГРАНИТОВ В ДАЙКАХ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ
БЕРЕЗОВСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ)**

**С.Ю. Степанов¹, Е.С. Шагалов¹, Р.С. Паламарчук²,
А.В. Кутырев³, Л.Н. Шарпенюк⁴, Ф.М. Набиуллин⁵
А.Н. Трошкина⁵,**

¹*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15
e-mail: Stepanov-1@yandex.ru*

²*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН
456317, Россия, Челябинская обл., г. Миасс, территория Ильменский заповедник*

³*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский)
683006, Россия, Петропавловск-Камчатский, Бульвар Пуйпа, д. 9*

⁴*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского
199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, Средний пр., д. 74*

⁵*ООО «Берёзовский рудник»
623703, Россия, Свердловская область, Берёзовский, ул. Берёзовский тракт, д. 1*

**MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF THE METASOMATIC
TRANSFORMATION OF GRANITES IN DIKES OF THE NORTHERN PART OF
THE BEREZOVSKOE ORE FIELD (MIDDLE URALS)**

**S.Yu. Stepanov¹, E.S. Shagalov¹, R.S. Palamarchuk², A.V. Kutyrev³, L.A. Sharpenok⁴, F.M.
Nabiullin⁵, A.N. Troshkina⁵**

¹*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry
620016, Russia, Ekaterinburg, s. akademika Vonsovskogo, 15
E-mail: Stepanov-1@yandex.ru*

²*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology
456317, Russia, Chelyabinsk district, g. Miass, territory of the Ilmeny State Reserve*

³*Institute of Volcanology and Seismology
683006, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky, Blvd. Piipa, 9*

⁴*A.P. Karpinsky Russian geological research institute
199106, Russia, St. Petersburg, Vasilievsky Island, Middle Ave, 74*

⁵*LLC “Berezovskiy mine” 623703, Russia, Sverdlovsk region, Berezovskiy, st. Berezovskiy
tract, 1*

ВВЕДЕНИЕ

Берёзовское золоторудное месторождение является одним из наиболее старых месторождений по добыче коренного золота в России, однако отрабатывается по настоящее время. До 70-х годов XX столетия основные работы на месторождении проводились до глубин 200 м. Во второй половине XX столетия в ходе работ треста Уралзолото, возглавляемых В.Ф. Каземирским, были подсчитаны запасы золота на нижних горизонтах Берёзовского рудного поля в метасоматически преобразованных гранитовых

дайках. Эти дайки пронизаны сульфидно-кварцевыми жилами, образующими системы полосовых (лестничных) жил. На сегодняшний день именно дайки с многочисленными сульфидно-кварцевыми жилами представляют основной промышленный интерес.

Исследованиями минералов, пород и руд на ранних этапах работ на Берёзовском месторождении занимались Г. Розе [1837], А. П. Карпинский [1888] и В. А. Обручев. Детальные разноплановые исследования были проведены на руднике в 60-х и 70-х годах XX столетия [Белавин и др., 1970; Попов, 1970; Попов, 1971; Самарцев и др., 1973; Чесноков и др., 1976; Куруленко, 1977 и др.]. Применение современных прецизионных, в том числе изотопных методов исследований, позволили в настоящее время с высокой детальностью исследовать руды Берёзовского месторождения [Сазонов, 1984; Бортников и др., 1998; Vaksheev *et al.*, 2001; Прибавкин, 2002; Сазонов и др., 2006; Сазонов и др., 2009; Бакшеев, Беляцкий, 2011; Спиридонов и др., 2013; Vikent'eva *et al.*, 2017; Прибавкин и др., 2018]. При этом абсолютное большинство исследователей заостряли своё внимание на разных типах рудоносных кварцевых жил и изучали, прежде всего, золоторудные парагенезисы. С разной степенью детальности обсуждены также проблемы привноса и выноса главных петрогенных компонентов [Бородаевская, 1944; Бородаевский, Бородаевская, 1947; Грабежев, 1970; Попов, 1971] и элементов-примесей [Сазонов и др., 2006; Сазонов и др., 2009] в ходе метасоматического преобразования гранитоидов и вмещающих их пород. Проводимые исследования были ориентированы главным образом на всестороннюю характеристику минеральных ассоциаций в уже разведанных частях рудного поля. Непосредственно в рудных блоках с относительно равномерным распределением сульфидно-кварцевых жил и золота не возникал вопрос о влиянии метасоматитов на распределение золота и о взаимосвязи их разных типов непосредственно с рудообразованием. Однако увеличение глубины отработки месторождения, особенно в северной части Берёзовского рудного поля, сопровождается возрастанием неоднородности распределения золота в блоках и более контрастным проявлением апогранитовых метасоматитов, существенно отличающихся по своему минеральному составу и пространственной связи с сульфидно-кварцевыми жилами. Совокупность этих фактов обуславливает необходимость продолжения исследований апогранитовых метасоматитов с выявлением пространственной и генетической связи различных ассоциаций метасоматических минералов с золотым оруденением.

В настоящей работе впервые для всех основных разновидностей апогранитовых метасоматитов, развитых в пределах северной части Берёзовского рудного поля, проведены геохимические исследования по широкому спектру элементов-примесей, подтвержденные затем детальным изучением минералов, слагающих эти метасоматиты.

Целью исследований являлось выявлению связи между различными типами апогранитовых метасоматитов и проявлением золотого оруденения на основании установленных закономерностей изменения минерального состава и миграции петрогенных элементов и элементов-примесей в ходе метасоматического процесса. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: выявление пространственно-временных закономерностей размещения апогранитовых метасоматитов и сульфидно-кварцевых жил по результатам изучения горных выработок шахтного поля; комплексное изучение метасоматитов и гранитов на основе петрографических и геохимических исследований; выявление минералов концентраторов элементов-примесей в гранитах и в метасоматитах.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований были выбраны породы даек: Ильинской, Андреевской и Второпавловской (гранит-порфиры), Севастьяновской, Первопавловской и Елизаветинской (плагитогранит-порфиры). Эти дайки вскрыты разведочными штреками, в некоторых из которых протяжённость фрагментов доступных для геологических наблюдений достигала 1400 м (Андреевская дайка, гор. -412 м). Предварительное изучение метасоматитов и сульфидно-кварцевых жил, залегающих на разных глубинах и на разном удалении от интрузивного тела (Шарташский массив), не позволили выявить метасоматическую зональность или систематическое изменение метасоматических и рудных минеральных ассоциаций. По результатам многочисленных геологических наблюдений в горных выработках Северной и Центральной шахт для детальных исследований были выбраны и задокументированы фрагменты дайковых тел с распространением разных типов метасоматитов и кварцевых жил. Образцы для петрографических исследований и анализа химического состава пород отбирались как из неизменённых гранитов, так и из всех типов обнаруженных апогранитовых метасоматитов из стенок горных выработок на глубинах от -512 до -162 м с общим количеством штуфов 134 штуки. Из образцов были изготовлены стандартные петрографические шлифы (185 шт.), прозрачно-полированные шлифы (123 шт) и аншлифы (89 шт).

С использованием растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа диагностированы и исследованы акцессорные минералы-концентраторы элементов-примесей в гранитах и метасоматитах. Изучение микропрепаратов проводилось с использованием растровых электронных микроскопов CamScan MX2500 (ФГБУ «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург, аналитик А.В. Антонов) и JEOL-JSM6390LV (ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, аналитик Е.С. Шагалов). Для определения составов минералов был использован ЭДС-спектрометр Link Pentafet (Oxford Instruments, Si(Li) детектор с площадью 10 мм² и разрешительной способностью 138 eV (на MnKa). Перед проведением исследований поверхность полированных образцов напылялась углеродом. Условия проведения микроанализа: ускоряющее напряжение – 20 kV, рабочее расстояние – 35 мм, величина тока зонда (на цилиндре Фарадея) – 0.5 nA, механизм коррекции матричных эффектов – ХРР (программный пакет INCA Energy), время накопления спектров – 70 секунд (без учета мертвого времени, которое составляло 25-40%). Оптимизация для количественных вычислений проводилась по химически чистому кобальту каждые 2 часа. Дрейф электронного пучка при замере на цилиндре Фарадея за указанное время изменялся не более чем на 3–5% от первоначального значения. В качестве стандартов использовались аттестованные природные и синтетические материалы: Cu – Cu_{мет}; Fe – Fe_{мет}; Ni – Ni_{мет}; Co – CoAsS; S – FeS_{2синт}; As – InAs; Sb – CuSbS₂; Te, Pb – PbTe; Bi – Bi_{мет}. Пределы обнаружения для отдельных элементов составляют (масс. %): Fe – 0.03, Ni – 0.03, Cu – 0.03, S – 0.05, As – 0.05, Co – 0.03, Pb – 0.08, Bi – 0.1.

Для исходных гранитов и метасоматитов было определено содержание микропримесей на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ELAN-DRC-6100 (ФГБУ «ВСЕГЕИ», аналитики В.А. Шишлов, В.Л. Кудряшов). Для определения содержания As в пробах использовалось царско-водочное разложение. Определение Se, Te, Ge, Cd, Ag, Sc, Tl, Bi, Ni, Co, Cu, Zn, Pb, In проводилось после полного кислотного разложения пробы. Пробоподготовка методом сплавления была проведена для определения REE, Cr, V, Ti, Rb, Sr, Y, Zr, Ba, W, Sn, Mo. Пределы обнаружения для Ba – 3 г/т, V – 2,5 г/т, Rb – 2 г/т, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Li, Be, Sr – 1 г/т, Mo –

0,6 г/т, Co, Zr, Nb, Te, W – 0,5 г/т, Se – 0,3 г/т, Sn – 0,2 г/т, Ga, Ge, Y, Cd, Sb, Cs, Ta, Tl, Bi, Th, U, As – 0,1 г/т, REE, Hf, Ag – 0,01. Содержания ртути были определены методом холодного пара на приборе Perkin Elmer Analyst – 800. Предел обнаружения для Hg – 0,01 г/т. Для определения содержания золота в породах использовался атомно-абсорбционный анализ на приборе Perkin Elmer Analyst – 600. Предел обнаружения Au – 0,002 г/т. Содержание серы определено на анализаторе АС-7932. Предел обнаружения для S – 0,01 %. Содержания петрогенных компонентов определены методом приближённо-количественного эмиссионного спектрального анализа. Предел обнаружения для большинства петрогенных компонентов – 0,01 %, для TiO₂ – 0,001 %, MnO – 0,0002 %. Группировка результатов определения содержаний элементов-примесей в гранитах и метасоматитах была проведена на основании номенклатуры, предложенной в работе Е. В. Скларова [Интерпретация геохимических ..., 2001].

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ СТРОЕНИЯ БЕРЁЗОВСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Берёзовское рудное поле расположено к северо-востоку от Шарташского гранитового массива (рис. 1) верхисетского комплекса каменноугольного возраста [Прибавкин и др., 2013]. В пределах рудного поля кровля интрузива постепенно погружается к северо-востоку [Беллавин и др., 1970], где развиты вулканиты и вулканогенно-осадочные породы новоберёзовской толщи ордовикского возраста, содержащей тектонические пластины ордовикских ультрамафитов первомайского комплекса. Породы новоберёзовской толщи и первомайского комплекса прорваны гранитовыми дайками третьей фазы внедрения Шарташского интрузива [Куруленко, 1977].

Большинство исследователей, исходя из особенностей геологического строения Березовского рудного поля, специфики состава рудных и жильных минералов, результатов изучения газовой-жидких включений и изотопных исследований, Берёзовское месторождение со всем многообразием типов руд, включая и шеелитовую минерализацию [Куруленко и др., 1983], относят к типичным плутоногенно-гидротермальным объектам с определяющей ролью в процессах рудообразования магматогенного флюида [Бортников и др., 1997; Vaksheev *et al.*, 2001; Бакшеев, Беляцкий, 2011; Vikent'eva *et al.*, 2017]. Ещё одним подтверждением связи метасоматических процессов и рудообразования с внедрением гранитоидов Шарташского интрузива является эндогенная зональность рудного поля, выраженная в изменении по мере удаления от интрузивного тела минеральных парагенезисов [Чесноков, 1973; Чесноков и др., 1976], преобладающих типов метасоматитов [Бородаевский, Бородаевская, 1947; Попов, 1970] и рудных ассоциаций [Самарцев и др., 1973].

По международной классификации Берёзовское рудное поле может быть отнесено к месторождениям золота, связанным с гранитовым магматизмом («intrusion related gold deposits»). В качестве аналогов Берёзовского месторождения могут быть рассмотрены месторождение Палпа-Окона в Перу, с аналогичной Au-As-Pb-Zn-Cu-Ag геохимической спецификой и многочисленными сульфидно-кварцевыми жилами [Schreiber *et al.*, 1990; Sillitoe & Thompson, 1998], Васильковское месторождение в Казахстане [Thompson *et al.*, 1999], а также золоторудные месторождения в провинции Тинтина («Tintina Gold Province») в Северо-Американских Кордильерах [Hart & Goldfard, 2005].

Геологическое строение Берёзовского рудного поля детально описано в ряде работ [Бородаевский, Бородаевская, 1947; Поленов и др., 2013; Прибавкин и др., 2013; Vikent'eva *et al.*, 2017]. Важной его особенностью является залегание даек гранитов в вулканогенно-

осадочных породах новоберёзовской толщи и в серпентинитах первомайского комплекса в виде двух линейно вытянутых зон, объединяющихся по падению. Как граниты даек, так и вмещающие их породы претерпели значительные метасоматические преобразования с формированием кварцевых жил: полосовых (лестничных), залегающих в гранитовых дайках, и красичных, пересекающих дайки и вмещающие их породы.

Неизменённые гранит-порфиры и плагиогранит-порфиры даек – отчётливо неравномернозернистые породы с вкрапленниками плагиоклаза (олигоклаз № 25–30), щелочного полевого шпата, кварца и относительно редко биотита, в сумме составляющих не более 50 % от объема породы. Основная масса – это мелко-тонкозернистый агрегат, состоящий из плагиоклаза, щелочного полевого шпата и кварца. Однако плагиогранит-порфиры содержат значительно меньше кварца и щелочного полевого шпата, вплоть до полного отсутствия последнего. В этом случае количество вкрапленников в среднем не превосходит 40–45%. Основная масса плагиогранит-порфиров в целом аналогична гранит-порфирам, при явном преобладании её в составе плагиоклаза.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петрографические и петрохимические признаки изменения гранитов при метасоматических процессах. В ходе петрографического изучения шлифов неизменных и метасоматически преобразованных гранитов было установлено, что в числе первых замещению мусковитовым агрегатом подвергся биотит (рис. 2). Затем кварц-мусковитовым агрегатом были замещены плагиоклаз и К-На полевые шпаты. Последними из первично-магматических минералов гранитов метасоматическому замещению были подвержены вкрапленники кварца. Конечными продуктами метасоматического преобразования гранитов являются средне-мелкозернистый кварц-мусковитовый агрегат или мономинеральные мусковитовые метасоматиты. Первые в подчинённом количестве содержат карбонаты и многочисленные метакристаллы пирита. Такие метасоматиты развиты преимущественно в приконтактных частях полосовых кварцевых жил, что, к примеру, отчётливо наблюдалось в Андреевской и Второпавловской дайках.

Наряду с кварц-мусковитовыми метасоматитами распространены крупно-среднезернистые мономинеральные мусковитовые метасоматиты, развивающиеся преимущественно вдоль трещин. Трещины могут быть выполнены кальцитом, агрегатом сульфидов или, крайне редко, кварц-карбонатными жилами. Для Ильинской и Второпавловской даек были отмечены мономинеральные мусковитовые метасоматиты вдоль кварцевых или кварц-карбонатных жил, содержащих кристаллы и зернистые агрегаты шеелита. Характерной особенностью этих метасоматитов является их повышенная пористость и повышенное содержание карбонатов (Fe-доломита и анкерита). Так, при петрографическом описании шлифов было установлено, что максимальная пористость может достигать 12,5 % от общего объёма породы. Стенки пор часто выполнены более поздним микродрузовым агрегатом кальцита, редко с участием Fe-доломита. Отмечены, кроме того, случаи полного замещения гранитов кварц-мусковитовым агрегатом без видимой связи с крупными трещинами и кварцевыми жилами (рис. 3) – в Ильинской и Севастьяновской дайках в пределах Северной части рудного поля на горизонтах -342 и -362 м соответственно.

Таким образом, по результатам петрографических наблюдений, а также геологических исследований, метасоматиты, развитые по гранитам даек в северной части

Берёзовского рудного поля, целесообразно подразделять на кварц-мусковитовые и мономинеральные мусковитовые.

Совокупность геологических наблюдений не позволяет говорить о какой-либо закономерности в распространении разных типов метасоматитов в пределах гранитовых даек. Петрографические наблюдения позволили также сделать вывод об отсутствии статистически значимой изменчивости минерального состава апогранитовых метасоматитов в пространстве, что свидетельствует об отсутствии метасоматической зональности в пределах изученного фрагмента (2,4 км по простиранию и в среднем 400 метров по глубине) Берёзовского рудного поля. Области распространения кварц-мусковитовых и мономинеральных мусковитовых метасоматитов совпадают (рис. 4, б, в). В пределах Андреевской и Второпаловской даек выявлены зоны со значительным распространением мономинеральных мусковитовых метасоматитов (рис 4, г).

Для всех исследованных разрезов наблюдается аналогичная картина метасоматического преобразования исходных гранитов. Этот факт обуславливает необходимость изучения характера распределения породообразующих элементов и элементов-примесей в гранитах и в метасоматитах в рамках отдельно взятых конкретных околожильных или околотрециных фрагментов разрезов метасоматически преобразованных даек.

Анализ результатов петрохимических исследований пород показал, что процессы метасоматического преобразования гранитов приводят к существенному выносу кремнекислоты и Na_2O (табл. 1). Концентрации остальных петрогенных элементов приведены в дополнительных материалах. Граниты в среднем содержат 72–73% SiO_2 и 4% Na_2O , в кварц-мусковитовых метасоматитах их содержание составляет 65–67% SiO_2 и 0,15% Na_2O , мономинеральные мусковитовые метасоматиты содержат 50–54% SiO_2 и 0,12% Na_2O . Содержание Na_2O даже при слабом проявлении метасоматических процессов существенно снижается, достигая минимальных значений как в кварц-мусковитовых, так и в мономинеральных мусковитовых породах. Характер изменения химического состава пород при метасоматозе наглядно демонстрирует расчёт количественного изменения вещества гранит-порфиоров Второпаловской дайки при их замещении кварц-мусковитовыми и мономинеральными мусковитовыми породами (табл. 1). Общая потеря вещества от объёма первичного гранита, рассчитанная по методике В.А. Рудника (1962), учитывающей не только изменение содержаний компонентов, но и изменение объёмного веса, плотности и пористости пород, составляет 3,25 масс. % для кварц-мусковитовых и 10,9 масс. % для мономинеральных мусковитовых метасоматитов, что коррелирует с увеличением пористости пород.

Содержание K_2O и Al_2O_3 в метасоматитах по сравнению с неизменёнными гранитами (табл. 1) существенно возрастает. В мономинеральных мусковитовых метасоматитах также значительно увеличивается содержание CaO . Привнос ряда главных петрогенных компонентов отражается на изменении минерального состава метасоматических пород и сопровождается, прежде всего, образованием мусковита и карбонатов (Fe-доломита и кальцита) как в кварц-мусковитовых, так и в мономинеральных мусковитовых метасоматитах.

Признаки геохимических процессов при метасоматическом преобразовании гранитов. Анализ характера распределения *редкоземельных элементов* в гранитах и метасоматических породах (рис. 5) позволил установить ряд закономерностей. Граниты различных даек обладают близкими спектрами распределения РЗЭ при отрицательном

наклоне кривой и отсутствии европейской аномалии (рис. 5, а). Концентрации всех РЗЭ приведены в дополнительных материалах. Для кварц-мусковитовых метасоматитов (рис. 5, б) характерно относительно повышенное содержание лёгких редкоземельных элементов, по сравнению с их концентрациями в неизменённых гранитах, при сопоставимом содержании тяжёлых РЗЭ. Аналогичная закономерность в распределении РЗЭ выявлена в мономинеральных мусковитовых метасоматитах (рис. 5, в). Показательно сопоставление содержаний РЗЭ в породах из тех даек, в которых проявлены все разновидности метасоматитов. Так, сопоставление кривых, распределения РЗЭ в гранитах и метасоматитах Андреевской и Второпавловской даек (рис. 5, г, д), показывает закономерное увеличение содержания РЗЭ в метасоматитах, по сравнению с неизменёнными гранитами. При этом в Андреевской дайке мономинеральные мусковитовые метасоматиты, по сравнению с кварц-мусковитовыми, характеризуются повышенным содержанием тяжёлых РЗЭ. Для пород Второпавловской дайки характерна противоположная направленность. Сопоставление средних содержаний РЗЭ (рис. 5, е) наглядно демонстрирует тенденцию их накопления в метасоматитах при повышенных содержаниях лёгких РЗЭ в мономинеральных мусковитовых породах и тяжёлых РЗЭ в кварц-мусковитовых разновидностях.

Содержание *высокозарядных элементов* (рис. 6) в гранитах и метасоматитах не имеют существенных отличий. Однако граниты характеризуются слабой обогащённостью Th, U, Ta и Nb. По характеру распределения высокозарядных элементов кварц-мусковитовые метасоматиты (рис. 6, б) полностью аналогичны таковым для исходных гранитов. Для мономинеральных мусковитовых метасоматитов (рис. 6, в), по сравнению с гранитами и кварц-мусковитовыми метасоматитами, характерно обогащение Th, U, Y, Zr, Hf, Nb и Ta. Взаимосвязи между содержанием высокозарядных элементов в исходных породах и метасоматитах от расположения их в структуре рудного поля не выявлено. Концентрации высокозарядных элементов приведены в дополнительных материалах.

При анализе распределения высокозарядных элементов в отдельно взятых дайках (рис. 6, г, д), выявленные закономерности в целом подтверждаются. Сравнение средних содержаний высокозарядных элементов в гранитах и развитых по ним метасоматитах (рис. 6, е) наглядно демонстрирует совпадение спектров гранитов и кварц-мусковитовых метасоматитов, исключая Zr и Hf, и повышенное содержание большинства элементов в мономинеральных мусковитовых метасоматитах.

Анализ характера распределения *крупноионных литофильных элементов* (концентрации приведены в дополнительных материалах) позволил выявить две наиболее значимые закономерности: уменьшение содержания Sr от гранитов к кварц-мусковитовым и мономинеральным мусковитовым метасоматитам (рис. 7, б, в) и увеличение содержания W в метасоматитах. При этом кварц-мусковитовые метасоматиты незначительно обогащены вольфрамом, тогда как мономинеральные мусковитовые метасоматиты, по сравнению с гранитами, содержат его в 3–4 раза больше (рис. 7, в). Анализ средних содержаний крупноионных литофилов в разных типах пород позволил установить также обеднённость метасоматитов Li, по сравнению с гранитами (рис. 7, г).

Корреляционный анализ содержаний элементов-примесей в исследуемых породах позволил установить, что в единую ассоциацию с золотом входят: As, Sb, Tl, Pb, Bi, In, Ag, Ga, Cu, Zn, Cd, Se, Te, Co, Ni (рис. 8); дополнительно на этой диаграмме рассмотрены содержания W и Ge. В гранитах (рис. 8, а) содержание этих элементов варьирует незначительно, исключение составляют лишь Au и Te, что вызвано слабым проявлением

рудообразующих процессов в гранитах, не содержащих признаков метасоматического преобразования. Кварц-мусковитовые метасоматиты характеризуются повышенными содержаниями всех элементов, входящих в золоторудную ассоциацию, за исключением Ge (рис. 8, б). Особенно высоки в кварц-мусковитовых метасоматитах содержания таких элементов как As, Sb, Pb, Bi, Ag, Cu, Co, Ni. В мономинеральных мусковитовых метасоматитах, по сравнению с гранитами, выявлены относительно повышенные содержания только W, As, Sb, Co и Ni (рис. 8, в). Концентрации перечисленных элементов приведены в дополнительных материалах.

Акцессорные минералы кварц-мусковитовых и мономинеральных мусковитовых метасоматитов. При изучении полированных шлифов, изготовленных из разных типов метасоматитов, были уставлены многочисленные новообразованные минералы, концентрирующие элементы-примеси.

Из наиболее распространённых минералов-концентраторов *редкоземельных элементов* необходимо отметить монацит-(Ce). Этот минерал широко распространён в мономинеральных мусковитовых метасоматитах (рис. 9, а–в) и реже встречается в кварц-мусковитовых (рис. 9, г). Монацит образует мелкие сложно огранённые индивиды, преимущественно расположенные в слюдяной массе совместно с пиритом, апатитом и цирконом. В его составе варьирует содержание La и Ce, а также существенно изменяется содержание других РЗЭ (табл. 2). Новообразованный циркон широко распространён в кварц-мусковитовых метасоматитах, образуя хорошо огранённые длиннопризматические кристаллы (рис. 9, г, д), часто с отчётливо проявленной ростовой зональностью. Существенно реже новообразованные цирконы встречаются в мономинеральных мусковитовых метасоматитах. В то же время реликтовые цирконы из гранитов в ходе метасоматических процессов часто подвержены замещению. Например, в кварц-мусковитовых метасоматитах Елизаветинской дайки выявлены случаи замещения циркона сложным тонкокристаллическим агрегатом, предположительно торианита, с сохранением реликтов циркона (рис. 9, е). В качестве основной примеси в составе циркона диагностирован Hf. Его содержания могут достигать 1,03 масс. % в неизменённых цирконах (табл. 2). Широким распространением среди новообразованных акцессорных минералов пользуется также апатит. Он присутствует в виде многочисленных кристаллов, вероятнее всего, пинакоидального габитуса, различного размера (в среднем 50–70 мкм). В преобладающем большинстве анализов (табл. 2) фиксируется присутствие в составе апатита фтора со средним содержанием 3,7 масс. %.

Из числа *U-Th минералов* в мономинеральных мусковитовых метасоматитах наиболее широко распространён уранинит. Он диагностирован в образцах из Второпавловской и Андреевской даек. Уранинит часто встречается совместно с пиритом в виде цепочек зерен в мусковитовом агрегате (рис. 10, а, б, г). Реже уранинит формирует каймы обрастания вокруг крупных метакристаллов пирита (рис. 10, в). В составе уранинита может присутствовать до 2,20 масс. % Th, от 3,12 до 8,54 масс. % Pb и 1–3% Fe (табл. 3). Торианит формирует сложные метасоматические агрегаты, замещающие циркон (рис. 10, д) или встречается в виде идиоморфных включений размером менее 10 мкм в пирите (рис. 10, е). Вся совокупность химических анализов, полученных в результате проведённых исследований, позволяет говорить о присутствии в мономинеральных мусковитовых метасоматитах минералов полного изоморфного ряда уранинит-торианит.

В качестве минералов концентраторов *олова* были установлены касситерит, феррокестерит и станнин (рис. 11; табл. 4). Эти минералы обнаружены только в качестве

включений в метакристаллах пирита из мономинеральных мусковитовых метасоматитов. *Вольфрам* концентрируется в красноморите, вольфрамсодержащем рутиле и шеелите. Они встречаются преимущественно в мономинеральных мусковитовых метасоматитах. Шеелит достаточно часто образует идиоморфные кристаллы размером от долей миллиметров до нескольких сантиметров в мусковитовых метасоматитах Ильинской, Севастьяновской и Второпавловской даек и реже распространён в аналогичных метасоматитах Андреевской дайки. В редких случаях размер кристаллов шеелита достигает нескольких сантиметров.

Из числа рудных минералов – сульфидов и сульфоарсенидов в мономинеральных мусковитовых метасоматитах широко распространены только пирит и редко галенит (рис. 12, а), а в кварц-мусковитовых метасоматитах часто встречаются сложные полиминеральные сростания, состоящие из пирита, галенита, блёклых руд (преобладает теннантит), халькопирита и других минералов (рис. 12, б–г). Важной морфологической особенностью кристаллов пирита является преобладание в мономинеральных мусковитовых метасоматитах пентагондодекаэдрических кристаллов, а в кварц-мусковитовых метасоматитах кристаллов кубического габитуса с комбинационной штриховкой, вызванной переходом к пентагондодекаэдру. В ряде случаев в метакристаллах пирита из кварц-мусковитовых метасоматитов, особенно из призальбандовых частей сульфидно-кварцевых жил, выявлены небольшие включения самородного золота с примесью серебра (рис. 12, г; табл. 5).

Обобщая результаты минералогических исследований, важно подчеркнуть, что среди новообразованных акцессорных минералов в кварц-мусковитовых метасоматитах широко распространены циркон, рутил, пирит, блёклые руды, галенит, халькопирит. Для мономинеральных мусковитовых метасоматитов характерно преобладание среди новообразованных акцессорных минералов циркона, монацита, фторапатита, пирита, уранинита. В целом проведённые исследования позволяют говорить о существовании разных типов минеральных парагенезисов в кварц-мусковитовых и мономинеральных мусковитовых метасоматитах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Закономерности, отражающие последовательность проявления процессов замещения гранитов в дайках Северной части Берёзовского рудного поля, выявленные в ходе наших исследований, аналогичны последовательности метасоматических преобразований пород, установленной ранее для пород даек Южной части рудного поля [Бородаевская, 1944; Бородаевский, Бородаевская, 1947; Попов, 1970], гранитов Шарташского интрузива [Грабежев, 1970] и в целом для метасоматитов березит-лиственитовой формации [Сазонов, Бородаевский, 1980]. Из всего многообразия апогранитовых метасоматитов, описанных для Берёзовского месторождения [Бородаевская, 1944; Бородаевский, Бородаевская, 1947], в северной части рудного поля преобладают околожилные кварц-мусковитовые и околотрецинные мономинеральные мусковитовые метасоматиты. При этом, если говорить об определении типа этих метасоматитов, необходимо учесть, что термин «березиты» для них не совсем удачен в связи с преобладанием в их составе мусковита и отсутствием серицита [Плющев и др., 2012].

Тесная сопряжённость в пространстве двух преобладающих типов метасоматитов (см. рис. 4) указывает на их формирование вследствие единого процесса, но в рамках разных его стадий. По аналогии с результатами исследований южной части Берёзовского

рудного поля мономинеральные мусковитовые метасоматиты аналогичны слюдяным крупнолистоватым березитам, сформированным в рамках грейзеновой стадии [Бородаевский, Бородаевская, 1947]. Кварц-мусковитовые метасоматиты аналогичны слюдяно-кварцевым мелкозернистым березитам, образованным в условиях стадии следующей за грейзеновой [Бородаевский, Бородаевская, 1947], при более низкотемпературных условиях. Случаи последовательного замещения мономинеральных мусковитовых метасоматитов кварц-мусковитовыми метасоматитами крайне редки.

Главными процессами, отражающими изменение химического состава гранитов в ходе метасоматического преобразования, являются частичный вынос SiO_2 и полная потеря Na_2O с привносом K_2O и Al_2O_3 , что также согласуется с результатами предыдущих исследований [Бородаевская, 1944; Бородаевский, Бородаевская, 1947; Грабежев, 1970; Попов, 1971]. В целом же потеря массы вещества при метасоматозе, по результатам расчётов для гранитов и метасоматитов Второпавловской дайки, составляет 3,25 масс. % для кварц-мусковитовых и 10,9 масс. % для мономинеральных мусковитовых метасоматитов. Большая часть этого вещества – кремнекислота, которая расходуется главным образом на формирование кварца сульфидно-кварцевых жил [Попов, 1971]. Процесс формирования мономинеральных мусковитовых метасоматитов предшествует формированию сульфидно-кварцевых жил. В то же время формирование кварц-мусковитовых метасоматитов происходит синхронно с образованием сульфидно-кварцевых жил. Таким образом, мономинеральные мусковитовые метасоматиты образуются в ходе выноса ряда компонентов (SiO_2 , Na_2O) в гидротермальную систему, а кварц-мусковитовые метасоматиты формируются в условиях привноса вещества, как и образование сульфидно-кварцевых жил.

По характеру распределения элементов-примесей, исследованные гранит-порфиры из даек Березовского рудного поля, в целом, аналогичны гранитам Верхисетского массива [Ферштатер, 2013]. Следует отметить, что содержание Au в слабо преобразованных гранитах из даек на порядок превосходит его стандартное содержание в породах земной коры [Pitcair, 2011], что является следствием формирования в них рассеянной вкрапленности сульфидных минералов даже при незначительных метасоматических изменениях.

Результаты геохимического анализа метасоматитов на 51 элемент, приведенные в статье впервые, и анализ характера распределения в метасоматитах элементов-примесей позволили установить, что замещение гранитов кварц-мусковитовыми и мономинеральными мусковитовыми метасоматитами сопровождается увеличением содержания в них целого ряда элементов-примесей, прежде всего Sc, Th, U, Zr, Hf, Nb, Ta, REE, Cu, Ga, Ge, As, Se, In, Sb, Tl, Pb, Bi, W, Sn, Rb, Ag, Au. Из всего спектра перечисленных элементов, по результатам корреляционного и факторного анализов (рис. 13), удалось установить две геохимические ассоциации. В первую геохимическую ассоциацию объединены W, Sc, Zr, Hf, Ga, REE, U, Th, Ta, Nb, накопление которых связано с процессами формирования мономинеральных мусковитовых метасоматитов. Во вторую – элементы, тесно коррелирующие с золотом и накапливающиеся преимущественно в ходе формирования околожилных кварц-мусковитовых метасоматитов, то есть Cu, Pb, Bi, As, Sb, Co, Ni, Ba, In, Cd, Mo, Te, Ag, Au. Установленные геохимические ассоциации закономерно дополняют характеристику разных типов метасоматитов. Сочетание элементов-примесей первой ассоциации скорее характерно для процесса грейзенизации. Элементы-примеси второй геохимической

ассоциации типичны для золоторудных месторождений, связанных с интрузивными комплексами [Schreiber *et al.*, 1990; Sillitoe & Thompson, 1998; Hart & Goldfarb, 2005].

Накопление высокозарядных и редкоземельных элементов, малоподвижных при метаморфических и гидротермальных процессах [Pearce & Cann, 1971; Floyd & Winchester, 1975; MacLean & Barrett, 1993; Интерпретация геохимических..., 2001], подтверждается результатами минералогических исследований. Установлено, что при замещении гранитов кварц-мусковитовыми метасоматитами уменьшается отношение La_N/Lu_N , что обусловлено широким распространением в этом типе метасоматитов новообразованного циркона – концентратора тяжёлых РЗЭ. Формирование мономинеральных мусковитовых метасоматитов, напротив, сопровождается повышением отношения La_N/Lu_N . Этот факт обусловлен ограниченным количеством новообразованного циркона и широким распространением среди новообразованных акцессорных минералов монацита (ранее монациты были описаны С.В. Прибавкиным [2002] только в пегматитах Шарташского массива) и фторапатита. Увеличение по сравнению с гранитами содержания Zr и Hf во всех типах метасоматитов вызвано образованием минералов изоморфного ряда циркон–коффинит–торит.

До 2018 года минералов радиоактивных элементов на Берёзовском месторождении описано не было. Существует лишь упоминание о неподтверждённой находке торбернита в 1988 году [Суставов, 2002]. Нами при исследовании мономинеральных мусковитовых и отчасти кварц-мусковитовых метасоматитов обнаружены ториацит и уранинит. В качестве включений в пирите из сульфидно-кварцевых жил в гранитовых дайках Берёзовского месторождения установлены также мелкие зёрна браннерита [Попова и др., 2018; Шагалов и др., 2018]. В пиритах из мономинеральных мусковитовых метасоматитов диагностированы минералы ряда торит–коффинит [Шагалов и др., 2018]. Выявленная U-Th минерализация в мономинеральных мусковитовых метасоматитах объясняет их обогащение этими элементами по сравнению с неизменёнными гранитами.

Присутствие перечисленных выше новообразованных акцессорных минералов, исключая торий- и урансодержащие, установлено для высокотемпературных апопикритовых гумбеитов, исследованных в северной части Берёзовского рудного поля Э. М. Спиридоновым с соавторами [2013]. Таким образом, формирование минералов-концентраторов «малоподвижных» элементов подтверждает выводы [Rubin *et al.*, 1993] о возможности переноса этих элементов в гидротермальных системах. В то же время, существенное распространение новообразованных циркона, монацита и апатита также подтверждает ранее выявленную тенденцию накопления редкоземельных элементов при формировании среднетемпературных метасоматитов березит-лиственитовой формации, в том числе и для метасоматитов Берёзовского рудного поля [Сазонов и др., 2006; Сазонов и др., 2009].

Характер распределения крупноионных литофильных элементов во многом обусловлен образованием акцессорных минералов в метасоматитах.

Для мономинеральных мусковитовых метасоматитов характерно повышенное содержание Sn и W – типичных рудных элементов грейзеновой ассоциации. Накопление олова в метасоматитах обусловлено распространением включений минералов олова в метакристаллах пирита из метасоматитов. Ранее на месторождении были описаны касситерит [Бородаевский, Бородаевская, 1947; Павлишин и др., 1988] и кестерит [Филимонов, 1999]. Кроме выше указанных минералов были обнаружены также более железистые разновидности кестерита, вплоть до феррокестерита и станнина. Составы этих

минералов соответствуют таковым из других месторождений аналогичной формационной принадлежности [Moore, Howie, 1984, Kołodziejczyk et al., 2016]. Главным минералом концентратором вольфрама в метасоматитах является шеелит. Он содержит весьма незначительное количество примесей, что характерно для шеелитов из гидротермальных золоторудных месторождений [Ghaderi et al., 1999]. Новообразованный рутил, содержащий вольфрам, аналогичен минералам, описанным в гумбеитах Берёзовского рудного поля [Филимонов, 2000] и обнаруженным как в кварц-мусковитовых, так и в мономинеральных мусковитовых метасоматитах. По сравнению с шеелитом, он оказывает меньшее влияние на увеличение содержания вольфрама.

В кварц-мусковитовых метасоматитах наряду с пиритом широко распространены галенит, блёклые руды и халькопирит. Такие элементы как As, Sb, Cu, Zn, Bi и Ag являются минералообразующими и примесными компонентами блеклых руд [Филимонов, 2009]. В кварцевых жилах, пространственно и генетически связанных с кварц-мусковитовыми метасоматитами, диагностированы минералы висмута [Прибавкин и др., 2018], теллура [Филимонов, 2000], кадмия и индия [Шагалов и др., 2018]. Присутствие этих минералов в жилах обуславливает повышенное содержание минералообразующих компонентов в околожилных метасоматитах. Ассоциация элементов-примесей, включающая Co, Ni, As, Sb, Cu, Zn, Pb, Bi, Te, Cd, In и Ag и характерная для кварц-мусковитовых метасоматитов соответствует продуктивной полиметаллической золоторудной ассоциации, типичной для сульфидно-кварцевых жил Берёзовского месторождения [Самарцев и др., 1973]. Из элементов, входящих в золоторудную ассоциацию, в мономинеральных мусковитовых метасоматитах повышенные концентрации свойственны только Co и Ni, основными концентраторами которых являются метакристаллы пирита.

Обращает на себя внимание увеличение отношения Au/Ag в ходе процесса преобразования гранитов: 0.10–0.25 для слабо измененных гранитов и 2.38–3.60 для кварц-мусковитовых метасоматитов. Установленная закономерность ярко выражена для пород Андреевской и Второпавловской даек. Однако аналогичное накопление Au по сравнению с серебром наблюдается и при рассмотрении состава мусковитовых метасоматитов, для которых характерно незначительно повышенное, по сравнению с гранитами, содержание Au, а содержания Ag находятся на таком же или даже меньшем уровне.

При анализе результатов геохимических исследований установлены две стадии единого метасоматического процесса. На первой стадии происходил существенный вынос SiO_2 и накопление Zr, Y, REE, Be, Sn, W с образованием минералов-концентраторов этих элементов. С учётом петрографических данных, первая стадия отвечает образованию мономинеральных мусковитовых метасоматитов. На второй стадии, вероятно, относительно более низкотемпературной, происходило накопление Bi, Sb, Cu, Pb, Au, Ag и формировались сульфидно-кварцевые жилы и генетически связанные с ними кварц-мусковитовые метасоматиты

Для оценки влияния распространённости разных типов метасоматитов на характер распределения золота в блоках по дайкам целесообразно рассмотреть разрезы с распределением золота. В контурах одного из блоков Второпавловской дайки (рис. 14, а, б), содержащего кварц-мусковитовые и мономинеральные мусковитовые метасоматиты, установлено крайне неравномерное распределение золота, тяготеющее главным образом к столбообразному особо обогащённому участку. Очевидно, что неравномерное

распределение золота вызвано, прежде всего, неравномерным распределением сульфидно-кварцевых жил в пределах блока. Снижение концентрации кварцевых жил на единицу объёма дайкового тела характерно для областей развития мономинеральных мусковитовых метасоматитов. А сами метасоматиты, в свою очередь, не содержат сульфидных минералов из золоторудной ассоциации. При сочетании этих факторов участки даек, где граниты замещены мономинеральными мусковитовыми метасоматитами, не представляют промышленного интереса. В то же время существенное перераспределение кремнекислоты и рудных компонентов приводит к образованию внутри даек особо богатых фрагментов рудных тел, по геометрии напоминающих «рудные столбы».

Иной пример представляет собой один из блоков Ильинской дайки (рис. 14, в, г), где преимущественно распространены кварц-мусковитовые метасоматиты с подчинённым количеством мономинеральных мусковитовых метасоматитов. Здесь в метасоматитах широко распространены новообразованные минералы из золоторудной ассоциации. Кварцевые жилы в этом блоке распределены равномерно и характеризуются относительно равномерными высокими содержаниями золота, что позволяет рассматривать значительные фрагменты блока в качестве богатых золотом участков, представляющих промышленный интерес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований установлено, что в пределах Берёзовского рудного поля в гранитовых дайках пространственно и генетически сопряжены два типа метасоматитов – кварц-мусковитовые и мономинеральные мусковитовые. Они формируются в рамках единого процесса, но на разных его стадиях. Формирование мономинеральных мусковитовых метасоматитов сопряжено с процессом выноса петрогенных компонентов, прежде всего SiO_2 и Na_2O , а сами метасоматиты характеризуются «грейзеновой» геохимической специализацией с накоплением W, Sc, Zr, Hf, Ga, REE, U, Th, Ta, Nb. Кварц-мусковитовые метасоматиты сопровождают формирование сульфидно-кварцевых жил. Вследствие накопления Pb, Bi, As, Sb, Co, Ni, Ba, In, Cd, Mo, Te, Ag, Au геохимические особенности этих метасоматитов соответствуют золотополиметаллической геохимической ассоциации, типичной для большинства золоторудных жильных месторождений, генетически связанных с интрузивными породами. Таким образом, в пределах локальных участков различных даек показано, что наиболее благоприятные условия для формирования золотого оруденения возникают в условиях, соответствующих фации формирования мусковит-кварцевых метасоматитов.

Золотое оруденение локализовано в сульфидно-кварцевых жилах и, в меньшей степени, в околожильных кварц-мусковитовых метасоматитах. Необходимая для образования этих метасоматитов и кварцевых жил кремнекислота высвобождается в ходе процесса развития мономинеральных мусковитовых метасоматитов. В результате проведённых исследований охарактеризована единая гидротермально-метасоматическая система. В её пределах на стадии выноса компонентов формируются грейзеноподобные относительно высокотемпературные метасоматиты, а на стадии привноса – относительно низкотемпературные метасоматиты, близкие по минеральному составу к березитам с золоторудной геохимической специализацией.

Благоприятными для формирования промышленно значимых концентраций золота являются условия, при которых получают максимальное распространение кварц-мусковитовые метасоматиты. Присутствие мономинеральных мусковитовых

метасоматитов, сформированных в условиях выноса петрогенных компонентов, неблагоприятно влияет на распределение сульфидно-кварцевых жил в объёме метасоматически преобразованных гранитовых даек. Следствием этого является крайне неравномерное распределение золота с образованием столбообразных рудных тел, что существенно осложняет корректный подсчёт запасов при проведении геологоразведочных работ.

Установленные геохимические закономерности подтверждены результатами минералогических исследований. Относительно высокотемпературный процесс формирования мономинеральных мусковитовых метасоматитов в условиях выноса кремнекислоты и привноса щелочей (прежде всего K_2O) сопровождается формированием специфического парагенезиса акцессорных минералов: шеелита, циркона, монацита, фторапатита, кестерита, W-рутила, торита и коффинита. Для кварц-мусковитовых метасоматитов, образовавшихся в относительно низкотемпературных условиях с менее значительным выносом кремнекислоты или реже с её несущественным привносом, а также привносом K_2O , в меньшей степени характерны новообразованные минералы концентраторы PЗЭ, W, Sn U и Th. Из вновь образованных акцессорных минералов преобладают сульфиды (пирит, галенит, халькопирит, блёклые руды), обуславливающие золотополиметаллическую геохимическую специализацию этих метасоматитов.

Совокупность полученных результатов, основанных, прежде всего, на современных геохимических и минералогических аналитических исследованиях, позволила на новом уровне подтвердить стадийность проявления метасоматических процессов, выявленную предшественниками (Бородаевский, Бородаевская, 1947) для южной части Берёзовского месторождения. Показано, что единый метасоматический процесс на ранних стадиях приводит к выносу в систему большого количества кремнекислоты с образованием обогащённых рудными компонентами растворов и последующей их кристаллизацией при более низкотемпературных условиях с выполнением сульфидно-кварцевых жил, сопровождающимися околожилными кварц-мусковитовыми метасоматитами.

Благодарности. Авторы статьи благодарят сотрудников геологического управления Берёзовского рудника за помощь в проведении геологических исследований в горных выработках шахт Центральная и Северная. За помощь в проведении аналитических работ авторы признательны научному сотруднику ИЭМ РАН *Дмитрию Александровичу Ханину* и сотрудникам центральной лаборатории ФГБУ «ВСЕГЕИ» *Владимиру Анатольевичу Шишлову* и *Владимиру Леонидовичу Кудряшову*. За полноценное обсуждение результатов исследований и конструктивную критику авторы признательны профессору Санкт-Петербургского горного университета д.г.-м.н. *Александру Владимировичу Козлову*.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы АААА-А18-118052590032-6 государственного задания ИГГ УрО РАН. Название: Палеогеодинамика и эволюция структурно-вещественных комплексов при формировании земной коры континентального типа (на примере Урало-Монгольского складчатого пояса и Западно-Сибирской платформы).

ЛИТЕРАТУРА

Бакшеев И.А., Беляцкий Б.В. Sm-Nd и Rb-Sr изотопные системы шеелита Берёзовского золоторудного месторождения (Средний Урал). Литосфера, 2011, (4), с. 110–118.

Беллавин О.В., Вагшаль Д.С., Ниренштейн В.А. Шарташский гранитный массив (Средний Урал) и связь с ним золотого оруденения // Известия академии наук СССР, серия геологическая. 1970, (6), с. 86–90.

Бородаевская М.Б. О происхождении березитов и некоторых других метасоматических пород Березовского золоторудного месторождения на Среднем Урале, ЗВМО, 1944, Ч. 73, Вып. 2, с. 123–141.

Бородаевский Н.И., Бородаевская М.Б. Березовское рудное поле. М.: Металлургиздат, 1947, 264 с.

Бортников Н.С., Сазонов В.Н., Викентьева О.В., Викентьев И.В., Мурзин В.В., Наумов В.Б., Носик Л.П. Роль магматогенного флюида в формировании Березовского мезотермального золото-кварцевого месторождения, Урал // ДАН СССР, 1998, 363 (1), с. 82–85.

Грабежев А.И. Особенности березитизации гранитоидов Шарташского массива на Среднем Урале // Тр. ГГИ УФАН СССР, 1970, Вып. 86, с. 10–14.

Интерпретация геохимических данных: учеб. Пособие. Складов Е.В. и др. М.: Интрмеджинжиниринг, 2001, 288 с.

Карпинский А.П. Главнейшие типические горные породы, заключающие жильные месторождения золота в Берёзовском горном округе // Изв. Геол. Комитета. 1887-1888. IV (12), с. 475-478.

Куруленко Р.С. История формирования гранитоидов Шарташского массива // Ежегодник 1976 г. Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого: Свердловск, 1977, с. 39–41.

Куруленко Р.С., Траянова М.В., Кобузов А.С., Яблонская Л.В. Шеелитовая минерализация кварцевых жил Шарташского массива // Ежегодник-1983 ИГГ УНЦ АН СССР, 1984, с. 104–105.

Максимов М.М. Очерк о золоте. М., «Недра», 1977, 128 с.

Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А. Онтогенический метод в минералогии. Киев: Наукова думка. 1988. 120 с.

Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. СПб.: из-во ВСЕГЕИ, 2012, 560 с.

Поленов Ю.А., Огородников В.Н., Бабенко В.В. Берёзовское золоторудное месторождение кварцево-жильного типа – классический объект полихронного и полигенного генезиса // Литосфера, 2013, (6), с. 39–53.

Попов В.А. Онтогения кварца Берёзовского золоторудного месторождения на Урале: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук, Хабаровск, 1971, 18 с.

Попов В.А. Относительный возраст и типы березитов Берёзовского золоторудного месторождения. – В сб.: Метаморфические горные породы Урала. Свердловск, 1970, с. 93–95.

Попова В.И., Артемьев Д.А., Котляров В.А. О зональности формы и состава кристаллов пирита Берёзовского золоторудного месторождения (Урал) // Минералогия, 2019, 4 (2), с. 42–54.

Прибавкин С.В. Минеральный кадастр Шарташского массива // Вестник УрО МО РМО, 2002, (1). с. 107–128.

Прибавкин С.В., Монтеро П., Беа Ф., Ферштатер Г.Б. U-Pb возраст и состав пород Берёзовского золоторудного поля (Средний Урал) // Литосфера, 2013, (1). с. 136–145.

Прибавкин С.В., Сустанов С.Г., Готман И.А. Сульфосоли висмута Берёзовского района химический состав и минеральные ассоциации // Литосфера, 2018, 18 (3), с. 334–458.

Рудник В.А. Определение количественного изменения вещества при метасоматических процессах // Записки ВМО, 1962, Ч. ХСІ, Вып. 6, с. 683–689.

Сазонов В.Н. Березит-лиственитовая формация и сопутствующее ей оруденение. Свердловск: УрО АН СССР, 1984, 208 с.

Сазонов В.Н., Бородаевский Н.И. Генезис текстур и структур метасоматитов березит-лиственитовой формации. [препринт]. Свердловск: УНЦ РАН СССР, 1980, 29 с.

Сазонов В.Н., Викентьева О.В., Огородников В.Н. и др. РЗЭ в колонках пропилитизации, альбитизации и березитизации-лиственитизации пород различной кремнекислотности: эволюция распределения, причины и практическое значение // Литосфера, 2006, (3), с. 108–124.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Поленов Ю.А. Поведение РЗЭ в низкотемпературном гидротермальном процессе и их индикаторная роль на примере метасоматических колонок, дифференцированных по составу эдуктов (Урал) // Литосфера, 2009, (4), с. 51–66.

Самарцев И.Т., Захваткин В.А., Казимирский В.Ф. О зональности Берёзовского золоторудного месторождения на Среднем Урале // Геология руд. месторождений, 1973, 15 (1), с. 110–117.

Спиридонов Э.М., Нурмухаметов Ф.М., Сидорова Н.В., Коротаева Н.Н., Куликова И.М., Поленов Ю.А., Трошкина А.Н. Сингенетичные циркон, монацит, ксенотим и фторапатит апопикритовых флогопит-магнезитовых гумбеитов Берёзовского месторождения золота, Урал // Новые данные о минералах. Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, 2013, (48), с. 37–56.

Суставов С.Г. Минералы Берёзовского золоторудного месторождения // Уральская летняя минералогическая школа-2001. Екатеринбург: УГГГА, 2002, с. 80-94.

Ферштатер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: Изд-во РИО УрО РАН, 2013, 622 с.

Филимонов С.В. W-рутил из гумбеитов Берёзовского золоторудного поля (Средний Урал) // Уральская летняя минералогическая школа-2000. Екатеринбург: УГГГА, 2000, с. 376–378.

Филимонов С.В. Висмутовая и теллуровая минерализация гумбеитовой формации на северном фланге Берёзовского золоторудного месторождения (Vi-теннантит, Ag-Vi-галенит, айкинит; тетрадимит, Pb-тетрадимит, гессит) // Уральская летняя минералогическая школа-99. Екатеринбург: УГГГА, 1999, с. 292–294.

Филимонов С.В. Минералы группы блёклых руд индикаторы рудогенеза (на примере гидротермальных месторождений золота): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук, МГУ им. М.В. Ломоносова. Геологический факультет. М., 2009, 25 с.

Филимонов С.В. Первая находка кестерита $Cu_2(Zn,Fe)SnS_4$ и других In-содержащих минералов в Берёзовском золоторудном месторождении // Уральская летняя минералогическая школа-99. Екатеринбург: УГГГА, 1999, с. 291–292.

Чесноков Б.В. Покровский П.В., Сандлер Г.А. Вариации содержания серебра в золотинах Берёзовского рудного поля в связи с его эндогенной зональностью // Тр. СГИ. Свердловск, 1976, Вып. 124, с. 108–111.

Чесноков Б.В. Эндогенная зональность Березовского рудного поля на Среднем Урале // Доклады академии наук СССР. М.: 1973, Том 210, с. 915–917.

Чесноков Б.В., Котыбаева Н.Н., Бушмакин А.Ф. Эндогенные минералы висмута и никеля Берёзовского золоторудного месторождения на Среднем Урале // Тр. ГГИ УФАН СССР, 1975, Вып. 106, с. 123–126.

Шагалов Е.С., Степанов С.Ю., Веретенникова Т.Ю. К минералогии Берёзовского золоторудного месторождения (Средний Урал): сульфиды и минералы тория и урана // XXIV Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа – 2018». Сборник статей студентов, аспирантов, научных сотрудников академических институтов и преподавателей ВУЗов геологического профиля. Екатеринбург: ООО Универсальная типография «Альфа Принт», 2018, с. 252–260.

Baksheev, I.A., Prokof'ev, V.Yu. Ustinov, V.I. Genesis of metasomatic rocks and mineralised veins at the Berezovskoe deposit, Central Urals: Evidence from fluid inclusion and stable isotopes // *Geochem. Int.*, 2001, 39 (Suppl.2), p. 129–144.

Floyd P.A. Winchester J.A. Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1975, 27, p. 211–218.

Ghaderij M., Palin J.M., Campbell I.H., Sylvester P.J. Rare Earth Element Systematics Scheelite from Hydrothermal Gold Deposits in the Kalgoorlie-Norseman Region Western Australia // *Economic Geology*, 1999, V. 94, p. 423–438.

Hart C.J.R. & Goldfarb R.J. Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems. *New Zealand Minerals Conference Proceedings*, p. 125–133.

Kołodziejczyk J., Pršek J., Voudouris P., Melfos V., Asllani B. Sn-Bearing Minerals and Associated Sphalerite from Lead-Zinc Deposits, Kosovo: An Electron Microprobe and LA-ICP-MS Study // *Minerals*, 2016, 6 (2), p. 42; <https://doi.org/10.3390/min6020042>

MacLean, W. H. & Barrett, T. J. Lithogeochemical techniques using immobile elements. *Journal of Geochemical Exploration*, 1993 48(2). p. 109–133.

McDonough W. F., Sun S.-s. The composition of the Earth // *Chem. Geol.*, 1995, Vol. 120, p. 223–253.

Moore F., Howie R.A. Tin-bearing sulphides from St Michael's Mount and Cligga Head, Cornwall // *Mineralogical magazine*, September 1984, Vol. 48, p. 389–96.

Pearce J.A., Cann J.R. Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y // *Earth and Planetary Science Letters*, 1971, 12, p. 339–349.

Pitcairn I.K. Background concentrations of gold in different rock types // *Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B)*, 2011, Vol. 120, № 1, p. 31–38.

Rose G. *Mineralogisch-geognostische Reise nach dem Ural, dem Altai und Kaspischen Meere*. Berlin, 1837, Bd. 1, 408s.

Rubin J.N., Henry C.D., Price J.G. Mobility of zirconium and other "immobile" elements during hydrothermal alteration // *Chem. Geol.*, 1993, Bd. 110, p. 29–47.

Schreiber, D. W., Fonboté, L. and Lochmann, D. Geologic setting, paragenesis, and physicochemistry of gold quartz veins hosted by plutonic rocks in the Patag region // *Econ. Geol.*, 1990, 85, p. 1328–1347.

Sillitoe, R.H., Thompson, J.F.H. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits // *Resour. Geol.*, 1998, 48 (2), p. 237–250.

Thompson, J.F.H., Sillitoe, R.H., Baker, T., Lang, J.R., Mortensen, J.K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces // *Mineral. Dep.* 1999, 34, p. 323–334.

Vikent'eva O.V., Bortnikov N.S., Vikentyev I.V., Groznova E.O., Lyubimtseva N.G., Murzin V.V. The Berezovsk giant intrusion-related gold-quartz deposit, Urals, Russia: Evidence for multiple magmatic and metamorphic fluid reservoirs // *Ore Geology Reviews*, 2017, 91, p. 837–863.

Рис. 1. Геологическое строение Берёзовского рудного поля (с использованием материалов [Государственная геологическая..., Беллавин и др., 1970]. Условные обозначения: вулканогенно-осадочные породы (1 – туфы и туфопесчаники, 2 – базальты): 3 – песчаники арамильской толщи, 4 – базальты и туфы медведёвской толщи, 5 – породы кремнисто-терригенной толщи, 6 – базальты, туфы и туффиты новоберёзовской толщи; интрузивные породы: верхисетский комплекс (7 – граниты, 8 – гранодиориты), западно-верхисетский комплекс (9 – гранодиориты), пышминский комплекс (10 – габбро-долериты, 11 – габбро), первомайский комплекс (12 – перидотиты, 13 – ультрамафиты); контакты: 14 – согласные или интрузивные, 15 – тектонические; 16 – дайки гранитов; 17 – крупные разрывные нарушения. Белой линией выделены: штрих – обрабатываемая часть рудного поля, сплошная – область исследования.

Рис. 2. Зарисовка стенки штрека, пройденного по дайке Андреевская, с микрофотографиями шлифов из гранитов и метасоматитов. Условные обозначения: 1 – слабо изменённый гранит-порфир, 2 – гранит-порфир, замещённый кварц-мусковитовым агрегатом, 3 – мономинеральные мусковитовые метасоматиты, 4 – кварцевые жилы, 5 – крупные разрывные нарушения, 6 – мелкие трещины. Vt – биотит, Pl – плагиоклаз, Q – кварц, Msc – мусковит, Fsp – K-Na полевой шпат, Cal – карбонат.

Рис. 3. Зарисовка стенки штрека, пройденного по дайке Ильинская, с микрофотографиями шлифов, изготовленных из гранитов и метасоматитов. Условные обозначения: 1 – листвинитизированные туфы и туффиты основного состава, 2 – гранит-порфиры с кварц-мусковитовыми агрегатами, 3 – кварцевые жилы, 4 – преимущественно сульфидные жилы, 5 – участки кварцевых жил, с мономинеральными шеелитовыми агрегатами, 6 – кварцевые жилы с единичными кристаллами шеелита, 7 – кварц-мусковитовые метасоматиты, 8 – мономинеральные мусковитовые метасоматиты, 9 – мелкие трещины, 10 – крупные разрывные нарушения. Vt – биотит, Q – кварц, Msc – мусковит, Py – пирит.

Рис. 4. Породы Второпавловской дайки (а–в): а – слабоизменённые граниты (Grt), б – кварц-мусковитовые (Qz-Msc) околосильные метасоматиты, в – мономинеральные мусковитовые (Msc) околотрещинные метасоматиты; г – взаимоотношения разных типов метасоматитов в стенке штрека, пройденного по дайке Андреевская. Линии: сплошная белая – границы кварцевых жил, длинный белый штрих – границы распространения кварц-мусковитовых метасоматитов, короткий белый штрих – границы распространения мономинеральных мусковитовых метасоматитов.

Рис. 5. Диаграммы распределения РЗЭ в гранитах (а) и апогранитовых метасоматитах (б–в) из даек: А – Андреевской, В – Второпавловская, Е – Елизаветинской, Р – Первопавловской, I – Ильинской, S – Севастьяновской. Распределение РЗЭ в породах Андреевской (г), Второпавловской (д) и средние содержания по всем дайкам (е): Gr – граниты, Qz+Msc – кварц-мусковитовые метасоматиты, Msc – мономинеральные мусковитовые метасоматиты. Содержание элементов нормировано на хондрит Cl [McDonough, Sun, 1995].

Рис. 6. Диаграммы распределения высокозарядных элементов в гранитах (а), апогранитовых метасоматитах (б, в) из даек: А – Андреевской, V – Второпавловская, Е – Елизаветинской, Р – Первопавловской, I – Ильинской, S – Севастьяновской. Светло-розовым цветом показано поле составов гранитов. Средние содержания высокозарядных элементов в различных породах Андреевской (г), Второпавловской (д) и среднее по всем дайкам (е): Gr – граниты, Qz+Msc – кварц-мусковитовые метасоматиты, Msc – мономинеральные мусковитовые метасоматиты. Содержания элементов нормированы на хондрит Cl [McDonough, Sun, 1995].

Рис. 7. Распределение крупноионных литофильных элементов в гранитах (а), апогранитовых метасоматитах (б, в) и их средние содержания по всем дайкам в различных породах (г). Дайки: А – Андреевская, V – Второпавловская, Е – Елизаветинская, Р – Первопавловская, I – Ильинская, S – Севастьяновская. Разновидности пород: Gr – граниты, Qz+Msc – кварц-мусковитовые метасоматиты, Msc – мономинеральные мусковитовые метасоматиты. Содержания элементов нормированы на хондрит Cl [McDonough, Sun, 1995].

Рис. 8. Спайдер-диаграмма содержания типовых элементов золоторудной геохимической ассоциации в гранитах (а), апогранитовых метасоматитах (б, в) и их средние содержания в различных породах по всем дайкам (г). Дайки: А – Андреевская, V – Второпавловская, Е – Елизаветинская, Р – Первопавловская, I – Ильинская, S – Севастьяновская. Разновидности пород: Gr – граниты, Qz+Msc – кварц-мусковитовые метасоматиты, Msc – мономинеральные мусковитовые метасоматиты. Содержания элементов нормированы на хондрит Cl [McDonough, Sun, 1995].

Рис. 9. Новообразованные акцессорные минералы в мономинеральных мусковитовых (а–в) и кварц-мусковитовых метасоматитах (г–е), развитых по гранитам даек: Второпавловской (а, б), Андреевской (в, е) и Елизаветинской (г, д). Круг с крестиком – точки анализов, результаты которых приведены в таблице 2. Условные обозначения: Msc – мусковит, Qz – кварц, Py – пирит, Zrn – циркон, Ap – апатит, Rt – рутил, Mnz – монацит – (Ce), Dol – железистый доломит, Cal – кальцит, Tor – торианит.

Рис. 10. Новообразованные Th-U минералы в кварц-мусковитовых и мономинеральных мусковитовых метасоматитах, развитых по гранитам Андреевской (а, б, в, е) и Второпавловской (г, д) даек. Условные обозначения: Msc – мусковит, Qz – кварц, Py – пирит, Zrn – циркон, Urn – уранинит, Tor – торианит. Круг с крестиком – точки анализов, результаты которых приведены в таблице 3.

Рис. 11. Минералы концентраторы олова (а–в) и вольфрама (г–е) в виде включений в сульфидах или отдельных индивидов в мусковитовых метасоматитах из даек: Елизаветинской (а), Второпавловской (б, в), Андреевской (г), Севастьяновской (д) и Ильинской (е). Условные обозначения: Msc – мусковит, Py – пирит, Cst – касситерит, Stn (?) – минерал по составу близкий к станнину, Kst – кестерит, Fe-Kst – феррокестерит, Tnt – теннантит, Ttr – тетраэдрит, Krt – красногорит (?), Rt-W – вольфрамовый рутил, Rt – рутил, Ap – апатит, Sch – шеелит.

Рис. 12. Агрегаты сульфидных минералов из апогранитовых метасоматитов из даек: Второпавловской (а), Севастьяновской (б, в) и Елизаветинской (г). Условные обозначения: Msc – мусковит, Qz – кварц, Py – пирит, Gp – галенит, Tnt – теннантит, Csp – халькопирит, Au – самородное золото.

Рис. 13. Результат факторного анализа – диаграмма влияния факторов на распределение элементов.

Рис. 14. Характер распределения золота в одном из блоков Второпавловской дайки по западной (а) и восточной (б) стенкам горной выработки, а также Ильинской дайки по западной (в) и восточной (г) стенкам горной выработки. Содержание Au: 1 – <1 г/т; 2 – от 1 до 3 г/т; 3 – от 3 до 5 г/т; 4 – от 5 до 10 г/т; 5 – > 10 г/т; 6 – контуры «рудного столба».

Табл. 1. Расчёт количественного изменения вещества по методу В.А. Рудника (1962) при метасоматическом преобразовании плагиогранит-порфиоров Второпавловской дайки

| породы компо | Весовые проценты | | | | | | Миграция вещества | | | | | | |
|------------------------------------|------------------|-------|-------|--------------------|-------|--------|---|-------|-------|------------------------|--------------|---|--------------|
| | Данные анализа | | | Приведённые к 100% | | | кол-во компонентов в 1000 см ³ | | | Абсолютная разница в г | | Разница в % к массе окисла в 1000 см ³ гранита | |
| | ВП-4 | ВП-17 | ВП-37 | ВП-4 | ВП-17 | ВП-37 | ВП-4 | ВП-17 | ВП-37 | ВП-17 – ВП-4 | ВП-37 – ВП-4 | ВП-17 – ВП-4 | ВП-37 – ВП-4 |
| SiO₂ | 73.50 | 50.90 | 41.20 | 75.76 | 51.08 | 43.14 | 218.2 | 137.4 | 104.1 | -80.88 | -114.10 | -37.05 | -52.27 |
| | | | | | | | 8 | 0 | 8 | | | | |
| TiO₂ | 0.15 | 0.42 | 0.32 | 0.15 | 0.42 | 0.34 | 0.33 | 0.85 | 0.61 | 0.52 | 0.27 | 154.50 | 81.64 |
| Al₂O₃ | 13.40 | 28.10 | 28.60 | 13.81 | 28.20 | 29.95 | 46.82 | 89.24 | 85.08 | 42.42 | 38.26 | 90.61 | 81.73 |
| Fe₂O₃ | 1.62 | 8.08 | 4.57 | 1.67 | 8.11 | 4.79 | 3.62 | 16.39 | 8.68 | 12.77 | 5.07 | 353.35 | 140.19 |
| MnO | 0.04 | 0.01 | 0.20 | 0.05 | 0.01 | 0.21 | 0.11 | 0.01 | 0.43 | -0.10 | 0.32 | -88.02 | 287.03 |
| MgO | 0.49 | 0.95 | 0.95 | 0.51 | 0.95 | 0.99 | 2.17 | 3.82 | 3.58 | 1.65 | 1.41 | 76.22 | 65.08 |
| CaO | 1.21 | 0.18 | 6.88 | 1.24 | 0.18 | 7.21 | 3.84 | 0.52 | 18.63 | -3.32 | 14.79 | -86.45 | 385.30 |
| Na₂O | 2.63 | 0.24 | 0.13 | 2.71 | 0.24 | 0.14 | 15.12 | 1.25 | 0.64 | -13.86 | -14.48 | -91.71 | -95.79 |
| K₂O | 3.58 | 8.22 | 9.87 | 3.69 | 8.25 | 10.33 | 23.20 | 48.41 | 54.45 | 25.22 | 31.26 | 108.70 | 134.75 |
| P₂O₅ | 0.16 | 0.10 | 0.29 | 0.16 | 0.10 | 0.30 | 0.40 | 0.23 | 0.62 | -0.17 | 0.22 | -43.19 | 54.33 |
| SO₂ | 0.24 | 2.45 | 2.49 | 0.25 | 2.46 | 2.61 | 0.67 | 6.20 | 5.90 | 5.53 | 5.23 | 827.87 | 783.39 |
| Σ | 97.02 | 99.65 | 95.50 | 100.0 | 100.0 | 100.00 | 314.5 | 304.3 | 282.8 | -10.23 | -31.75 | -3.25 | -10.09 |
| | | | | 0 | 0 | | 5 | 2 | 0 | | | | |
| d об | 2.87 | 2.68 | 2.41 | | | | | | | | | | |
| d уд | 2.90 | 2.75 | 2.68 | | | | | | | | | | |
| П в % | 1.04 | 2.58 | 10.25 | | | | | | | | | | |

Примечание. Породы Второпавловской дайки: ВП-4 – гранит, ВП-17 – кварц-мусковитовый метасоматит, ВП-37 – мономинеральный мусковитовый метасоматит. **d об** – объёмный вес породы г/см³; **d уд** – плотность породы г/см³; **П** – пористость пород. Анализ петрогенных элементов выполнен методом приближенно-количественного эмиссионного спектрального анализа (ФГБУ «ВСЕГЕИ», аналитики В.А. Шишлов, В.Л. Кудряшов).

Табл. 2. Состав монацита, циркона, апатита и торита из кварц-мусковитовых и мономинеральных мусковитовых метасоматитов, масс. %

| № | Обр. | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | CaO | ZrO ₂ | HfO ₂ | La ₂ O ₃ | Ce ₂ O ₃ | Pr ₂ O ₃ | Nd ₂ O ₃ | Sm ₂ O ₃ | Gd ₂ O ₃ | F | ThO ₂ | Σ | Формула |
|----|-------|------------------|-------------------------------|-------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|------------------|--------|---|
| 1 | ВП-37 | – | 30.12 | – | – | – | 17.49 | 33.70 | 3.75 | 11.05 | 2.15 | 1.19 | – | – | 100.02 | (Ce _{0.48} La _{0.25} Nd _{0.16} Pr _{0.05} Sm _{0.03} Gd _{0.02} Dy _{0.01}) _{0.99} PO ₄ |
| 2 | ВП-37 | – | 41.94 | 54.94 | – | – | – | – | – | – | – | – | 3.1 5 | – | 100.02 | Ca _{4.99} (P _{1.00} O ₄) ₃ F _{0.84} |
| 3 | ВП-37 | – | 41.87 | 54.82 | – | – | – | – | – | – | – | – | 3.2 2 | – | 99.92 | Ca _{5.06} (P _{1.02} O ₄) ₃ F _{0.88} |
| 4 | ВП-35 | – | 29.98 | – | – | – | 21.51 | 36.18 | 3.64 | 8.78 | – | – | – | – | 100.09 | (Ce _{0.52} La _{0.31} Nd _{0.12} Pr _{0.05}) _{1.00} PO ₄ |
| 5 | ВП-35 | – | 30.05 | 2.13 | – | – | 13.58 | 32.18 | 2.72 | 10.60 | – | – | – | 8.49 | 99.74 | (Ce _{0.46} La _{0.19} Nd _{0.16} Pr _{0.04}) _{1.00} PO ₄ |
| 6 | ДЕ-1 | – | 30.55 | – | – | – | 17.30 | 34.34 | 3.73 | 11.23 | 1.53 | 0.93 | – | – | 100.00 | (Ce _{0.50} La _{0.25} Nd _{0.16} Pr _{0.05} Sm _{0.02} Gd _{0.01}) _{1.00} PO ₄ |
| 7 | ДЕ-1 | 32.61 | – | – | 65.90 | 1.61 | – | – | – | – | – | – | – | – | 100.12 | Zr _{0.99} Hf _{0.01} SiO ₄ |
| 8 | ДЕ-1 | – | 41.51 | 54.44 | – | – | – | – | – | – | – | – | 3.3 6 | – | 99.32 | Ca _{5.00} (P _{1.00} O ₄) ₃ F _{0.91} |
| 9 | ДЕ-1 | 32.69 | – | – | 66.45 | 0.84 | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.98 | Zr _{0.99} Hf _{0.01} SiO ₄ |
| 10 | ДЕ-1 | 32.51 | – | – | 66.85 | 0.51 | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.87 | Zr _{0.99} SiO ₄ |
| 11 | ДЕ-1 | 32.09 | – | – | 66.40 | 1.54 | – | – | – | – | – | – | – | – | 100.03 | Zr _{0.99} Hf _{0.01} SiO ₄ |
| 12 | ДЕ-1 | – | 41.71 | 55.01 | – | – | – | – | – | – | – | – | 3.1 2 | – | 99.84 | Ca _{5.01} (P _{1.00} O ₄) ₃ F _{0.84} |
| 13 | ДА-11 | 27.69 | – | 0.38 | 53.94 | 1.16 | – | – | – | – | – | – | – | 5.38 | 88.54 | – |
| 14 | ДА-11 | 13.31 | – | 2.49 | 14.33 | – | – | – | – | – | – | – | – | 45.55 | 75.68 | – |
| 15 | ДА-11 | 25.14 | – | 1.34 | 47.59 | 2.61 | – | – | – | – | – | – | – | 2.45 | 81.85 | – |

Примечание. Содержание Dy₂O₃ в анализе № 1 – 0.57 масс. %, UO₂ в анализе № 15 – 2.72 масс. %. Анализы № 1, 4, 5, 6 – монацит, № 2, 3, 8, 12 – апатит; № 7, 9–11 – циркон, 13–15 – минералы изоморфного ряда циркон–торит. Формулы рассчитаны на 4 атома О. Состав минералов определен с помощью СЭМ JEOL-JSM6390LV с ЭДС-приставкой Link Pentafet (ИГГ УрО РАН, аналитик Е.С. Шагалов).

Табл. 3. Состав Th-U минералов из кварц-мусковитовых и мономинеральных мусковитовых метасоматитов, масс. %

| № | Обр. | SiO ₂ | CaO | TiO ₂ | FeO | ZrO ₂ | PbO | ThO ₂ | UO ₂ | Σ | Формула |
|---|-------|------------------|------|------------------|------|------------------|-------|------------------|-----------------|-------|---|
| 1 | ДА-31 | – | 1.36 | – | 0.86 | – | 4.06 | 1.80 | 90.83 | 98.91 | (U _{0.91} Ca _{0.07} Pb _{0.05} Fe _{0.03} Th _{0.02}) _{1.07} O ₂ |
| 2 | ДА-11 | – | 1.35 | 2.73 | 0.90 | 15.58 | – | – | 78.79 | 99.35 | (U _{0.62} Zr _{0.27} Ti _{0.07} Ca _{0.05} Fe _{0.03}) _{1.04} O ₂ |
| 3 | ДА-11 | – | 2.99 | 0.00 | 0.68 | 5.16 | – | – | 76.92 | 90.51 | (U _{0.74} Ca _{0.14} Zr _{0.11} Fe _{0.02} W _{0.05}) _{1.06} O ₂ |
| 4 | ДА-31 | – | 1.53 | 1.18 | 2.15 | 2.72 | – | – | 64.57 | 72.15 | (U _{0.79} Fe _{0.10} Ca _{0.09} Zr _{0.07} Ti _{0.05}) _{1.09} O ₂ |
| 5 | ВП-37 | – | – | – | – | – | 9.20 | 2.50 | 69.21 | 80.92 | (U _{0.89} Pb _{0.14} Th _{0.03}) _{1.07} O ₂ |
| 6 | ВП-1 | 8.67 | 1.05 | – | 0.81 | 4.36 | 3.36 | 41.18 | 18.47 | 77.90 | – |
| 7 | ВП-1 | 4.32 | 0.62 | – | 0.80 | 4.01 | 27.73 | 25.47 | 12.76 | 75.70 | – |
| 8 | ДА-21 | 6.35 | – | – | – | – | – | 44.08 | 31.59 | 82.03 | – |

Примечание. Содержание W₂O₃ в анализе № 3 – 8,76 масс. %. Анализы № 1–5 – уранинит, рассчитаны на 2 атома кислорода в формуле, № 6–8 – смесь минералов изоморфного ряда торианит–уранинит с другими силикатами. Состав минералов определен с помощью СЭМ JEOL-JSM6390LV с ЭДС-приставкой Link Pentafet (ИГГ УрО РАН, аналитик Е.С. Шагалов).

Табл. 4. Состав минералов концентраторов W и Sn из кварц-мусковитовых и мономинеральных мусковитовых метасоматитов, масс. %

| № | образец | O | S | Ti | Fe | Cu | Zn | Sn | Mo | W | Ca | Σ |
|----|---------|-------|-------|-------|----------|-------|----------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | ДЕ-1.2 | 21.10 | – | – | – | – | – | 78.20 | – | – | – | 99.30 |
| 2 | ВП-54 | – | 29.53 | – | 7.1 4 | 29.04 | 6.6 3 | 27.46 | – | – | – | 99.80 |
| 3 | ВП-54 | – | 29.36 | – | 5.3 4 | 28.61 | 9.0 2 | 27.35 | – | – | – | 99.68 |
| 4 | ВП-54 | 21.12 | – | – | – | – | – | 78.62 | – | – | – | 99.74 |
| 5 | ДА-31 | 21.87 | – | 2.86 | – | – | – | – | – | 74.87 | – | 99.60 |
| 6 | СД-4 | 38.23 | – | 54.43 | 1.6 4 | – | – | – | – | 4.90 | – | 99.20 |
| 7 | СД-4 | 38.95 | – | 58.38 | 0.2 3 | – | – | – | – | 1.20 | – | 98.76 |
| 8 | ИД-32 | 21.90 | – | – | – | – | – | – | – | 64.04 | 13.55 | 99.49 |
| 9 | ИД-32 | 22.14 | – | – | – | – | – | – | 0.02 | 63.52 | 13.75 | 99.43 |
| 10 | ИД-32 | 21.94 | – | – | – | – | – | – | – | 63.98 | 13.63 | 99.55 |

Эмпирические формулы

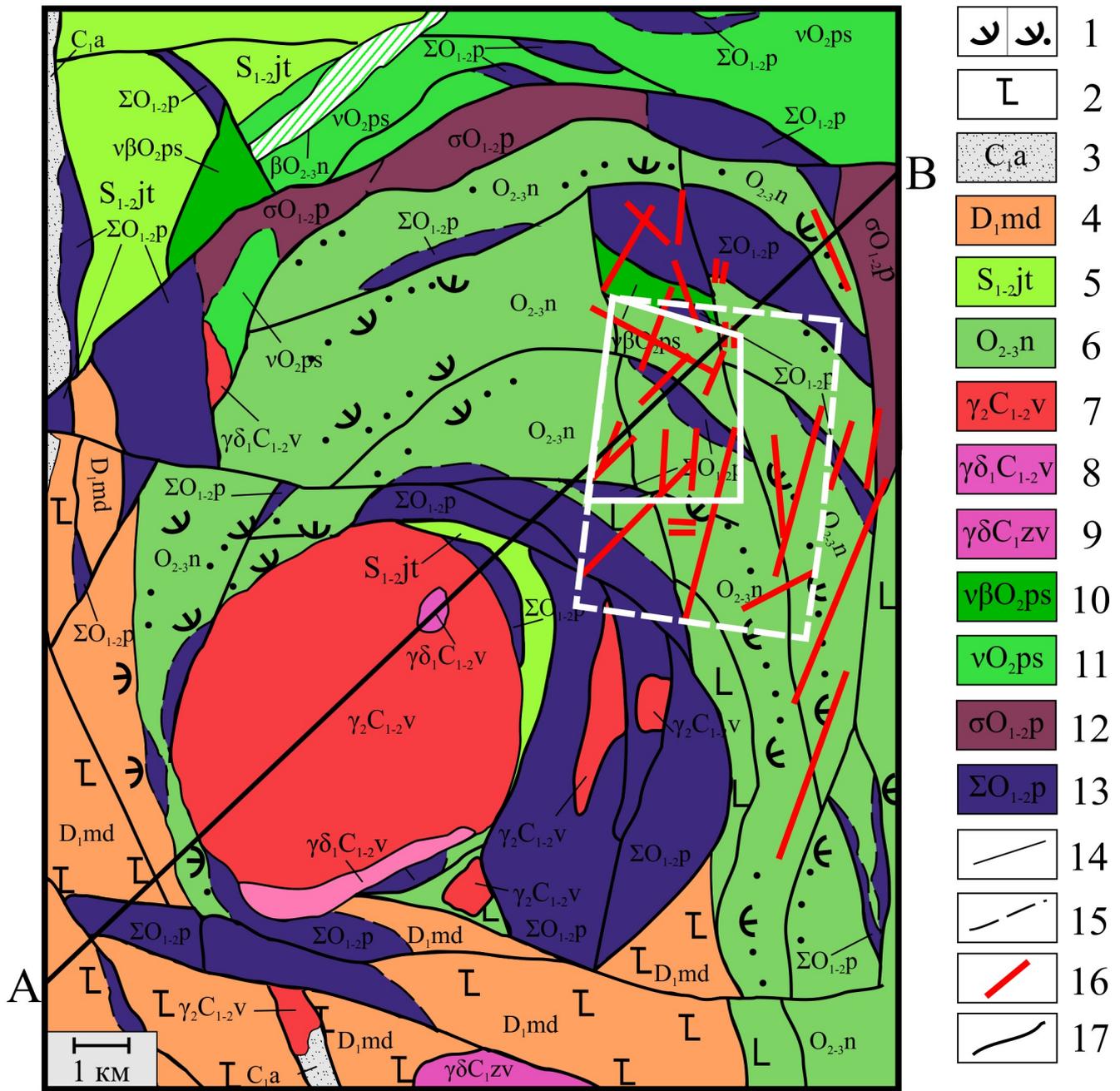
| | | |
|----|--------------------|--|
| 1 | Касситерит | $\text{Sn}_{0,99}\text{O}_2$ |
| 2 | Ферро-Кестёрит | $\text{Cu}_{1,98}\text{Fe}_{0,56}\text{Zn}_{0,44}\text{SnS}_4$ |
| 3 | Кестёрит | $\text{Cu}_{1,97}\text{Zn}_{0,60}\text{Fe}_{0,42}\text{SnS}_4$ |
| 4 | Касситерит | $\text{Sn}_{1,01}\text{O}_2$ |
| 5 | Красногорит | $\text{W}_{0,89}\text{Ti}_{0,13}\text{O}_2$ |
| 6 | W содержащий рутил | $\text{Ti}_{0,95}\text{Fe}_{0,02}\text{W}_{0,02}\text{O}_2$ |
| 7 | W содержащий рутил | $\text{Ti}_{0,95}\text{W}_{0,01}\text{O}_2$ |
| 8 | Шеелит | CaWO_4 |
| 9 | Шеелит | CaWO_4 |
| 10 | Шеелит | CaWO_4 |

Примечание. Формулы для анализов № 1, 4, 5, 6, 7 рассчитаны на 2 атома О, для анализов № 2, 3 на 8 атомов, для анализов № 7–9 на 4 атома О. Состав минералов определен с помощью СЭМ JEOL-JSM6390LV с ЭДС-приставкой Link Pentafet (ИГГ УрО РАН, аналитик Е.С. Шагалов).

Табл. 5. Состав минералов-сульфидов (1–14) и золота (15) из кварц-мусковитовых метасоматитов, масс. %

| № | Обр. | S | Fe | Cu | Zn | As | Sb | Ag | Pb | Au | Σ | Формула |
|----|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|----------|-------|-------|--------|---|
| 1 | ВП-17 | 53.15 | 46.10 | – | – | 0.81 | – | – | – | – | 100.06 | $\text{Fe}_{1,00}\text{As}_{0,01}\text{S}_{2,00}$ |
| 2 | ВП-17 | 53.30 | 46.14 | – | – | – | – | – | – | – | 99.46 | $\text{Fe}_{0,99}\text{S}_{2,00}$ |
| 3 | ВП-17 | 13.46 | 0.18 | 0.44 | – | – | – | – | 85.22 | – | 99.30 | $\text{Pb}_{0,98}\text{Cu}_{0,02}\text{Fe}_{0,01}\text{S}_{1,00}$ |
| 4 | СД-2 | 14.09 | 0.21 | 0.39 | – | – | – | 1.2 3 | 83.76 | – | 99.68 | $\text{Pb}_{0,93}\text{Ag}_{0,03}\text{Cu}_{0,02}\text{S}_{1,02}$ |
| 5 | СД-2 | 27.44 | 4.98 | 41.53 | 2.76 | 16.22 | 5.51 | 0.5 3 | – | – | 98.97 | $(\text{Cu}_{9,94}\text{Ag}_{0,07})_{10,01}$ $(\text{Zn}_{0,64}\text{Fe}_{1,36})_{2,00}$ $(\text{As}_{3,29}\text{Sb}_{0,69})_{3,98}\text{S}_{13,01}$ |
| 6 | СД-2 | 53.72 | 46.83 | 0.05 | – | 0.12 | – | – | – | – | 100.72 | $\text{Fe}_{1,00}\text{S}_{2,00}$ |
| 7 | ИД-7 | 53.39 | 46.54 | – | – | – | – | – | – | – | 99.99 | $\text{Fe}_{1,00}\text{S}_{2,00}$ |
| 8 | ИД-7 | 27.56 | 2.36 | 42.57 | 5.24 | 15.83 | 6.12 | 0.2 9 | – | – | 99.97 | $(\text{Cu}_{10,14}\text{Ag}_{0,04})_{10,18}$ $(\text{Zn}_{1,21}\text{Fe}_{0,64})_{1,85}$ $(\text{As}_{3,20}\text{Sb}_{0,76})_{3,96}\text{S}_{13,01}$ |
| 9 | ИД-7 | 13.27 | 0.29 | – | – | – | – | 0.4 0 | 86.49 | – | 100.45 | $\text{Pb}_{0,99}\text{Ag}_{0,01}\text{Fe}_{0,01}\text{S}_{0,99}$ |
| 10 | ДЕ-8 | 13.81 | 0.25 | 0.34 | – | – | – | 1.9 3 | 82.81 | – | 99.14 | $\text{Pb}_{0,93}\text{Ag}_{0,04}\text{Cu}_{0,01}\text{S}_{1,00}$ |
| 11 | ДЕ-8 | 53.88 | 45.95 | – | – | 0.56 | – | – | – | – | 100.45 | $\text{FeAs}_{0,01}\text{S}_2$ |
| 12 | ДЕ-8 | 53.96 | 45.71 | – | – | 0.45 | – | – | – | – | 100.18 | $\text{FeAs}_{0,01}\text{S}_2$ |
| 13 | ДЕ-8 | 28.17 | 5.22 | 44.93 | 1.15 | 19.36 | 1.27 | – | – | – | 100.10 | $\text{Cu}_{10,43}(\text{Fe}_{1,38}\text{Zn}_{0,26})_{1,64}$ $(\text{As}_{3,81}\text{Sb}_{0,15})_{3,97}\text{S}_{12,96}$ |
| 14 | ДЕ-8 | 35.71 | 29.98 | 34.11 | – | – | – | – | – | – | 99.80 | $\text{FeAs}_{0,01}\text{S}_2$ |
| 15 | ДЕ-8 | – | – | – | – | – | – | 9.0 6 | – | 90.89 | 99.95 | $\text{Au}_{0,85}\text{Ag}_{0,15}$ |

Примечание. Содержание Со для анализов № 2, 7, 11, 12 – 0.02 масс. %, Ni для № 7, 11 – 0.04 масс.%. Для анализов № 1, 2, 6, 7, 11, 12 (пирит) формулы рассчитаны на 2 атома S; для анализов № 3, 4, 9, 10 (галенит) на 2 атома в формуле, для анализов № 5, 8, 13 (блеклая руда) на 29 атомов в формуле, для анализа № 14 (халькопирит) на 4 атома. Состав минералов определен с помощью СЭМ JEOL-JSM6390LV с ЭДС-приставкой Link Pentafet (ИГТ УрО РАН, аналитик Е.С. Шагалов).



Разрез по линии А-В

