

УДК 550.42

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ): РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ

© 2007 г. Академик Н. П. Лаверов, член-корреспондент РАН И. В. Чернышев, А. В. Чугаев, Э. Д. Баирова, Ю. В. Гольцман, В. В. Дистлер, М. А. Юдовская

Поступило 05.03.2007 г.

Настоящее сообщение посвящено результатам изотопно-геохронологического Rb–Sr- и K–Ar-изучения месторождения Сухой Лог – одного из крупнейших в мире благороднометалльных месторождений, локализованных в черносланцевых осадочно-метаморфогенных комплексах. Месторождениям этого класса (Мурунтау, Узбекистан; Нежданинское, Россия; Ашанти, Гана и др.) принадлежит сейчас значительная роль в балансе как добываемого золота, так и потенциальных его запасов. Значение этого класса месторождений, и в первую очередь Сухого Лога, еще более возрастает в связи с открытием в некоторых из них платинового оруденения [1–3]. Для месторождения Сухой Лог остаются еще во многом дискуссионными вопросы, касающиеся происхождения и особенно возраста благороднометалльной минерализации.

Месторождение Сухой Лог расположено в пределах Байкало-Патомского нагорья и приурочено к Сухоложской антиклинали, являющейся одним из структурных элементов Бодайбинского синклинория (рис. 1). Район месторождения сложен преимущественно верхнепротерозойскими терригенно-карбонатными породами. Породы района метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации и смяты в линейно вытянутые складки. Вмещающие оруденение породы хомолхинской свиты, которые входят в состав ныгринской серии, претерпели метасоматическое преобразование. Метасоматиты сопровождают рудные тела, локализованы вдоль узких тектонических зон и наблюдаются в плане в виде участков, значительных по протяженности (километры) и мощности (десятки–сотни метров). Подробная характеристика метасоматических минералов и их химический состав приводятся в работе [4].

Месторождение Сухой Лог представляет собой пластообразную залежь северо-западного простирания. Наиболее крупным рудным телом является Сухоложское тело площадью около 4 км², сложенное прожилково-вкрапленными рудами, а также рудами золото-кварцевого малосульфидного типа, приуроченными к кварцевым жилам. Золото образует преимущественно самородные выделения в пирите и в кварце. Платиноидная минерализация на месторождении пространственно совмещена с прожилково-вкрапленной минерализацией. Доминирующей формой нахождения платины в рудах являются ее самородные выделения, а также

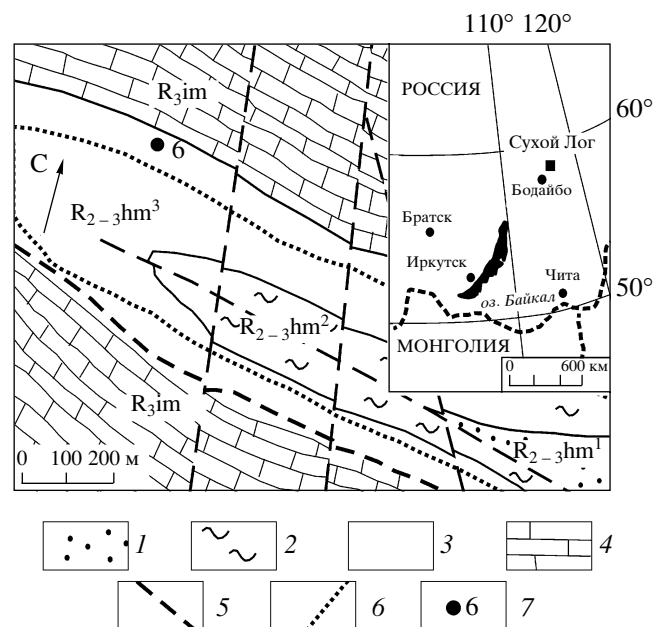


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Сухой Лог [2]. 1–3 – породы хомолхинской свиты ($R_{2-3}hm$): 1 – нижняя, 2 – средняя, 3 – верхняя пачки; 4 – известняки имняхской свиты (R_{3im}); 5 – тектонические нарушения; 6 – граница рудной зоны; 7 – скв. 6.

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва

металлические твердые растворы системы Pt–Fe–Cu [2].

Представления о возрасте минерализации Сухого Лога до недавнего времени основывались на геологических данных и вытекали из наиболее распространенной метаморфогенно-гидротермальной модели генезиса оруденения [5]. Согласно этой модели возраст месторождения считается докембрийским–раннепалеозойским. Опубликованные до начала наших исследований изотопно-геохронологические данные характеризуют только возраст магматических пород района месторождения Сухой Лог и смежных территорий. В работах [6, 7] приводится ряд датировок магматических пород, прорывающих рифейские осадочные толщи. Возраст различных базитовых пород за пределами рудного поля находится в интервале от 1050 до 620 млн. лет. Для гранитов Константиновского штока, обнажающихся в 6 км к юго-западу от месторождения, получены значения возраста около 300 млн. лет.

Главной задачей изотопного исследования месторождения Сухой Лог нам представлялось датирование собственно рудного вещества, результаты которого могли бы ответить на ключевые, но еще не решенные вопросы о возрасте Au–Pt-минерализации и о ее временной связи с процессами формирования и метаморфизма черносланцевых толщ.

Из минералов-геохронометров, традиционно изучаемых различными изотопными методами, в рудах месторождения присутствует только серицит гидротермально-метасоматического генезиса. Однако микрозернистый характер выделений серицита (менее 0.1 мм) и тесное их срастание с другими минералами (хлоритом, карбонатом и кварцем) не позволило сепарировать серицит с приемлемой степенью чистоты. Поэтому, используя в настоящей работе как основной Rb–Sr-изохронный метод, мы применили два геохронометра, нетрадиционных при датировании гидротермальных образований: валовые пробы руд и жильный кварц.

Использование валовых проб как геохронометров в Rb–Sr-изохронном датировании гидротермально-метасоматических процессов предполагает, что в ходе преобразования вещества вмещающих пород (черных сланцев в случае Сухого Лога) и различных новообразований минералов, в том числе и прожилковых минералов, гомогенизация изотопного состава стронция происходит во всем объеме изучаемого геологического тела. Уравновешивание изотопного состава стронция между минеральными компонентами породы, как отмечено в [8], облегчается вследствие высокой подвижности стронция в процессах с участием флюидной фазы.

Привлекательность геохронологического использования кварца, очевидно, определяется уже хотя бы тем обстоятельством, что этот минерал широко развит на золоторудных и многих других месторождениях, где обычно представлено различными генерациями и морфологическими типами. Вопросам Rb–Sr-датирования гидротермального кварца посвящено несколько работ [9–11]. Ограниченный объем получаемых по кварцу изотопных данных объясняется в первую очередь сложностью аналитической части методики. Применение кварца как Rb–Sr-геохронометра при изучении Сухого Лога основано на собственных исследованиях авторов [11], в результате которых была решена задача изотопного анализа особо малых количеств Sr и Rb, содержащихся в кварце, и сделаны оценки соотношения форм нахождения и характера геохимического поведения Rb–Sr-системы кварца.

Изотопно-геохронологическое изучение рудной минерализации месторождения Сухой Лог проведено на материале керна скв. № 6, пройденной в породах хомолхинской свиты и вскрывающей рудную зону месторождения в интервале глубин от 171 до 251 м (рис. 1). Рудная зона не имеет видимых границ, ее кровля и подошва определяются только по содержанию золота.

В а л о в ы е п р о б ы. Среди 12 образцов метасоматизированных черных сланцев, из которых были приготовлены валовые пробы для Rb–Sr-изохронного датирования, 10 отобраны в пределах рудной зоны. Они достаточно равномерно распределены в ее вертикальном разрезе и содержат золото-сульфидную минерализацию прожилково-вкрапленного типа. Два образца представляют черные сланцы за пределами рудной зоны. Из трех валовых проб были выделены фракции, обогащенные серицитом. Одна из этих фракций получена из обр. 6/49*, расположенного в разрезе скважины выше рудной зоны, две другие – из образцов, отобранных в пределах рудной зоны (обр. 6/220.15 и 6/248). Эти фракции помимо Rb–Sr-метода были проанализированы K–Ar-методом. Кроме того, Rb–Sr-методом изучены четыре образца метаосадочных пород широко распространенной в Бодайбинском синклинии валлютинской свиты – стратиграфического аналога хомолхинской свиты.

Вскрытые скважиной метасоматизированные черные сланцы, как показывают данные рентгенофлуоресцентного анализа, имеют выдержанный химический состав, который типичен для метапелитов зеленосланцевой фации метаморфизма. При этом нет существенных различий по содержанию главных элементов между черными сланцами из рудных и безрудных интервалов.

*Здесь и далее в нумерации образцов первая цифра обозначает номер скважины, а вторая – глубину.

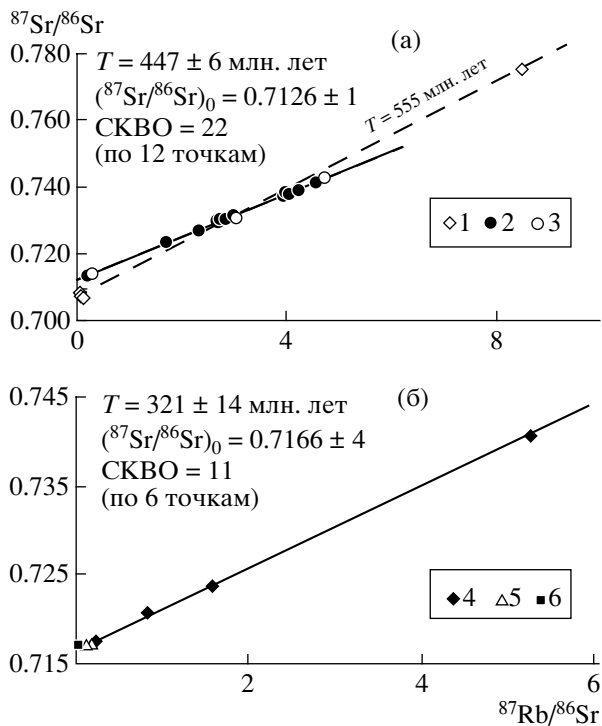


Рис. 2. Rb–Sr-диаграммы для пород и минералов месторождения Сухой Лог: а – для валовых проб метасадочных пород валухтинской и хомолхинской свит, б – для минералов кварцевых жил. 1 – породы валухтинской свиты за пределами рудного поля; 2 – рудовмещающие черные сланцы хомолхинской свиты; 3 – фракции пород хомолхинской свиты, обогащенные серицитом; 4 – кварц из поздних золотоносных жил; 5 – кислотная вытяжка из кварца; 6 – анкерит из поздних золотоносных жил.

Для черных сланцев, слагающих рудную зону, характерна микрозернистая структура и тонкополосчатая текстура. Основными породообразующими минералами являются серицит (35–50 об.%), кварц (20–35 об.%), карбонат (10–50 об.%). В меньшем количестве присутствуют полевые шпаты, хлорит, сульфиды и рассеянное углеродистое вещество. Полосчатая текстура сланцев обусловлена чередованием слоев, сложенных преимущественно серицитом и кварцем, и слоев, обогащенных углеродистым веществом и хлоритом. Начальная масса проб, подготовленных для Rb–Sr-изотопных измерений, а также для химического анализа, составляла 200–300 г.

Кварц. Объектом Rb–Sr-изучения служил гидротермальный кварц из жильных тел, несущих минерализацию золото-кварцевого малосульфидного типа, которая является более поздней, наложенной по отношению к минерализации прожилково-вкрапленного золото-сульфидного типа. Четыре мономинеральные фракции кварца были отобраны из жильных тел, вскрытых в пределах рудной зоны скважиной 6 (обр. 6/197.3, 6/198.8,

6/237), а также скв. 2 (обр. 2/198) в 800 м к западу от скв. 6. Жильные тела выполнены молочно-белым крупнокристаллическим массивным кварцем, содержание которого в образцах достигает 90–95 об.%. Среди кварцевой массы встречаются изометричные или слабо вытянутые скопления крупнокристаллического анкерита. Рудные минералы в образцах присутствуют в виде единичных зерен (до 2–3 мм) и представлены пиритом, реже халькопиритом. Изучение твердых микровключений в кварце показало наличие среди них фаз анкерита, серицита, апатита, пирита и монацита. Среди газовой-жидких включений преобладающим типом являются двухфазные включения первичного генезиса. В отобранной серии образцов кварца отсутствуют признаки поздней перекристаллизации жильного вещества.

Все измерения изотопного состава Sr и содержания Rb и Sr проводили на 7-коллекторном масс-спектрометре “Micromass Sector 54”. При изучении валовых проб использовались традиционно применяемые авторами настоящего сообщения методики изотопного анализа и химической подготовки [12, 13]. Кварц, в котором содержание Rb и Sr на два порядка ниже и опускаются до 0.1 мкг/г, анализировали с помощью специально разработанных методик [11], которые в комплексе обеспечили низкий уровень фона на всех стадиях (суммарный уровень фона по Rb и Sr составляет 0.06 и 0.11 нг соответственно) и высокую чувствительность масс-спектрометрических измерений. При анализе Sr валовых проб стандартная погрешность измерения отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ составляла 0.003% (2σ). Правильность результатов во всех случаях контролировали систематическими анализами стандартного образца Sr SRM-987. Погрешности анализов конкретных образцов приведены в табл. 1. Измерения K–Ar-возраста трех обогащенных фракций серицита выполнены в нашей лаборатории В.А. Лебедевым. В геохронологических расчетах использовали значения констант, рекомендованные в 1977 г. Международной подкомиссией по геохронологии.

Рассмотрим сначала результаты Rb–Sr-измерений, представленные в табл. 1. Содержания Rb и Sr в серии проанализированных проб из скв. 6 варьируют в широких пределах, соответственно 39–180 и 62–610 мкг/г, обуславливая значительную дисперсию изотопных отношений $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Это, в свою очередь, служит благоприятной предпосылкой для изохронного датирования данной серии образцов.

На Rb–Sr-диаграмме экспериментальные точки, отвечающие образцам сланцев из керна скв. 6, образуют линию регрессии с параметрами $T = 447 \pm 6$ млн. лет и $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7126 \pm 1$ и величиной среднего квадрата взвешенных отклонений SKBO = 22 (рис. 2). Эта линейная зависимость

Таблица 1. Результаты Rb–Sr-изучения пород и минералов месторождения Сухой Лог

№ обр.	Анализируемый материал	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ($\pm 2\sigma$)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($\pm 2\sigma$)
		мкг/г			
Метаосадочные породы за пределами рудного поля (валюхтинская свита)					
685-13	Алевросланцы	125	43	8.49 \pm 4	0.77548 \pm 2
6105-19	Доломитолиты	0.9	830	0.0031 \pm 2	0.70825 \pm 2
691-29	Черные известняки	0.9	590	0.0044 \pm 5	0.70828 \pm 2
6105-42	Доломитолиты	3.3	770	0.0124 \pm 5	0.70819 \pm 2
Рудовмещающие черные сланцы (хомолхинская свита)					
6/49	Сланцы за пределами рудной зоны	110	135	2.32 \pm 2	0.72720 \pm 2
6/49-A	То же, фракция, обогащенная серицитом	145	140	3.03 \pm 2	0.73111 \pm 2
6/171	Сланцы из рудной зоны	115	110	2.99 \pm 2	0.73209 \pm 2
6/178	То же	110	120	2.71 \pm 2	0.73017 \pm 2
6/192	»	140	100	4.02 \pm 3	0.73776 \pm 2
6/198.1	»	59	62	2.79 \pm 2	0.73067 \pm 2
6/210.8	»	150	98	4.56 \pm 2	0.74155 \pm 2
6/220.15	»	150	110	4.01 \pm 2	0.73849 \pm 2
6/220.15-A	То же, фракция обогащенная серицитом	180	110	4.71 \pm 3	0.74270 \pm 2
6/221	Сланцы из рудной зоны	120	88	3.96 \pm 2	0.73734 \pm 2
6/231.2	То же	130	89	4.25 \pm 3	0.73980 \pm 2
6/247.4	»	97	170	1.69 \pm 4	0.72341 \pm 2
6/248	Карбонатизированные сланцы из рудной зоны	39	500	0.227 \pm 2	0.71408 \pm 2
6/248-A	То же, фракция, обогащенная серицитом	58	610	0.275 \pm 2	0.71430 \pm 2
6/254.4	Сланцы за пределами рудной зоны	87	88	2.85 \pm 2	0.73050 \pm 2
Поздние кварцевые жилы					
6/237	Кварц	0.106	0.059	5.26 \pm 3	0.74060 \pm 12
	Кислотная вытяжка	0.0005	0.004	0.20 \pm 15	0.7174 \pm 9
6/198.8	Кварц	0.021	0.0865	0.820 \pm 7	0.72072 \pm 14
	Кислотная вытяжка	0.0002	0.011	0.092 \pm 4	0.7171 \pm 3
6/197.3	Кварц	0.060	0.1097	1.57 \pm 1	0.72360 \pm 13
2/198	Кварц	0.0055	0.0860	0.186 \pm 2	0.71722 \pm 14
6/237	Анкерит	0.0001	1430	0.001 \pm 1	0.71710 \pm 2

* Здесь и далее в нумерации образцов первая цифра обозначает номер скважины, а вторая – глубину.

близка к изохронной, о чем свидетельствуют как малые погрешности вычисленных параметров – возраста (± 6 млн. лет или 1.3 отн.%) и начального отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (± 0.0001 или 0.015%), так и относительно невысокое значение СКВО. Этой же линии регрессии, которую мы далее будем называть изохроной, соответствуют три точки, отвечающие фракциям, обогащенным серицитом. Если включить их в расчет, то параметры изохроны существенно не изменятся и составят: СКВО = 31, $T = 446 \pm 6$ млн. лет, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7126 \pm 1$. Положение точек рудных и безрудных образцов на общей изохроне свидетельствует о том, что в райо-

не месторождения было проявлено событие с возрастом 447 ± 6 млн. лет, приведшее к гомогенизации изотопного состава Sr во всех минеральных компонентах черных сланцев. Эта гомогенизация охватила значительный объем пород, по крайней мере, объем, пересекаемый скв. 6. Возможная причина наблюдаемой на изохронной диаграмме относительно небольшой геохимической дисперсии точек, которая вызвала повышенное значение СКВО, вероятно, состоит в том, что в рудовмещающих породах месторождения Сухой Лог новообразованные гидротермально-метасоматические минералы тесно ассоциируют с

реликтами минералов метаморфогенного происхождения.

На Rb–Sr-диаграмме точки пород валюхтинской свиты, которые не претерпели метасоматических изменений, отклоняются от изохроны (рис. 2). Аппроксимирующая их линия имеет наклон, отвечающий возрасту 555 млн. лет. Эта датировка носит оценочный характер. Однако отметим, что она не противоречит значению 513 ± 22 млн. лет [14], которое рассматривается как возраст метаморфизма терригенно-осадочных рифейских толщ Уринского поднятия (северная часть Байкало-Патомского нагорья), в стратиграфическом разрезе которых присутствуют также породы валюхтинской свиты.

Rb–Sr-изотопные характеристики получены для четырех образцов кварца и двух кислотных вытяжек. Экспериментальные точки, отвечающие кварцу и кислотным вытяжкам, образуют на Rb–Sr-диаграмме изохронную зависимость с параметрами $T = 321 \pm 14$ млн. лет, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7166 \pm 4$ и СКВО = 11 (рис. 2). Повышенное значение СКВО, по-видимому, объясняется некоторой неоднородностью начального отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в исследованных образцах, отобранных из разных пространственно разобщенных жильных тел.

Значения K–Ar-возраста, полученные для обогащенных фракций серицита, выделенных из трех пространственно разобщенных валовых проб, совпадают в пределах аналитических погрешностей: обр. 6/49-A – 329 ± 13 млн. лет; обр. 6/220.15-A – 328 ± 6 млн. лет; обр. 6/248-A – 313 ± 10 млн. лет. Rb–Sr-датировка кварца (321 ± 14 млн. лет) вместе с приведенными K–Ar-данными указывает на возраст события, с которым связан повторный импульс гидротермальной деятельности на месторождении, а также нарушение замкнутости K–Ar-изотопной системы тонкодисперсного серицита в метасоматизированных черных сланцах.

Таким образом, в результате впервые проведенного изотопно-геохронологического изучения собственно рудного вещества месторождения Сухой Лог зафиксировано два разновозрастных события с возрастом 447 ± 6 и 321 ± 14 млн. лет, которые отвечают двум основным этапам формирования месторождения, разделенным периодом около 120 млн. лет. На раннем этапе происходило гидротермально-метасоматическое преобразование пород хомолхинской свиты и образование прожилково-вкрапленной минерализации. В течение второго этапа на месторождении Сухой Лог сформировались поздние золотоносные кварцевые жилы.

Реальность двух рассмотренных Rb–Sr-датировок подтверждается согласованностью вычисленных по изохронам величин начальных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Расчет показывает, что за период

126 млн. лет, разделяющий датированные события, отношение $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ должно было увеличиться в метасоматизированных породах в среднем на величину 0.005 и при исходном значении 0.7126 ± 1 (валовые пробы метасоматизированных сланцев) достичь величины около 0.718. Близкое значение получено по изохроне для кварца ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.7166 \pm 4$) и непосредственно измерено (0.71710 ± 2) в анкерите, ассоциирующем с кварцем.

Полученные датировки определенно указывают на то, что формирование крупномасштабной благороднометальной минерализации на месторождении связано с проявленной в регионе палеозойской тектоно-магматической активизацией. Полученные данные пока не позволяют связать процесс образования прожилково-вкрапленных руд 447 ± 5 млн. лет назад со становлением какого-либо интрузивного тела. Выходы магматических пород такого возраста в районе месторождения не известны, однако нельзя исключать их присутствие на глубине. Так, по геофизическим данным в гравитационном поле района месторождения обнаруживается локальный минимум, который свидетельствует о присутствии под месторождением скрытого гранитного плутона [15]. Возобновление гидротермальной деятельности на месторождении Сухой Лог, приведшей к формированию малосульфидных золото-кварцевых жил (321 ± 14 млн. лет), по времени совпадает со становлением известных в этом районе кислых интрузий конкудеро-мамаканского и аглан-янского комплексов, которые в работе [7] были датированы K–Ar- и U–Pb-методами.

Для района месторождения Сухой Лог возраст регионального метаморфизма рифейских черносланцевых толщ с помощью изотопных методов пока надежно не установлен. Однако сейчас имеются оценки возраста этого процесса, которые по разным данным [14, 6, настоящая работа] лежат в интервале от 570 до 510 млн. лет. Из этих оценок, взятых в совокупности с рассмотренными выше результатами датирования минерализации, следует, что процессы благороднометального рудообразования на месторождении Сухой Лог проявились значительно позже регионального метаморфизма вмещающих черносланцевых пород.

Работа выполнена при поддержке Программы № 8 фундаментальных исследований ОНЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанов Г.Л., Немеров В.К., Коробейников Н.К., Семейкина Л.К. В кн.: Платина России. Проблема развития минерально-сырьевой базы платиновых минералов. М.: Геоинформмарк, 1994. С. 150–154.

2. Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. и др. // Геология руд. месторождений. 1996. Т. 38. С. 467–484.
3. Лаверов Н.П., Прокофьев В.Ю., Дистлер В.В. и др. // ДАН. 2000. Т. 371. № 1. С. 88–92.
4. Русинов В.Л., Русинова О.В., Борисовский С.Е., Альшеева Э.И. // ДАН. 2005. Т. 405. № 5. С. 661–666.
5. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. М.: Наука, 1982. 256 с.
6. Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н. и др. // Геология руд. месторождений. 1992. Т. 34. № 6. С. 3–15.
7. Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю., Гороховский Б.М. и др. В кн.: Изотопное датирование эндогенных формаций. М.: Наука, 1993. С. 124–146.
8. Горохов И.М. Рубидий-стронциевый метод изотопной геохронологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.
9. Shepherd T.J., Darbyshire D.P.F. // Nature. 1981. V. 290. P. 578–579.
10. Pettke Th., Diamond L.W. // Geochim. et cosmochim. acta. 1995. V. 59. № 19. P. 4009–4027.
11. Чугаев А.В., Чернышев И.В. В кн.: Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. М.: Геос, 2000. С. 395–398.
12. Чернышев И.В., Сердюк Н.И., Журавлев Д.З., Костицын Ю.А. В кн.: Масс-спектрометрия и изотопная геология. М.: Наука, 1983. С. 30–43.
13. Баирова Э.Д., Гольцман Ю.В. В кн.: Масс-спектрометрия и изотопная геология. М.: Наука, 1983. С. 60–67.
14. Виноградов В.И., Пичугин Л.П., Быховер В.Н. и др. // Литология и полез. ископаемые. 1996. № 1. С. 68–78.
15. Лишневский Э.Н., Дистлер В.В. // Геология руд. месторождений. 2004. Т. 46. № 1. С. 88–104.