

Сравнение изотопных данных, полученных Sm-Nd и Re-Os методами для минералов и пород рудопрооявления Озерное Салла-Куоляярвинской зоны

А. А. Калинин*, Т. В. Каулина, П. А. Серов

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
24.12.2020;

получена
после доработки
01.03.2021

Ключевые слова:

Салла-Куоляярвинская зона,
альбититы,
молибденит,
рений, Sm-Nd метод,
Rb-Sr метод,
Re-Os метод,
датирование

Sm-Nd изохрона, построенная по породообразующим и сульфидным минералам рудопрооявления Озерного, определяет возраст альбититов Салла-Куоляярвинской зоны 1759 ± 11 млн лет. Это говорит о синхронности образования альбититов и сульфидной минерализации в них и хорошо согласуется с полученными ранее значениями – U-Pb возрастом рутила 1757 ± 7 млн лет ($n = 3$, СКВО = 0,2), и Rb-Sr изохроной 1754 ± 39 млн лет по биотиту, апатиту, альбиту и породе в целом. В то же время опубликованные по рудопрооявлению Озерному данные Re-Os датирования молибденита 1872 ± 23 млн лет и халькопирита 1891 ± 230 млн лет указывают на существенно более древний возраст сульфидной минерализации, что противоречит определенному нами Sm-Nd и Rb-Sr методами возрасту породообразующих минералов. Рассматривается возможность использования молибденита для датирования рудопрооявлений Салла-Куоляярвинской зоны. Показана низкая достоверность данных, полученных Re-Os методом, что связано, во-первых, с весьма неоднородным распределением рения в молибдените, когда вариации его содержания могут превышать 1 мас.% даже в пределах одного зерна, и, во-вторых, с открытостью системы в отношении Re после кристаллизации молибденита: рений выносятся из минерала в гипергенных условиях. Вынос рения из молибденита способствует кажущемуся "удревнению" возраста. Исходя из уравнения радиоактивного распада и периода полураспада рения, для кажущегося увеличения возраста на 110–130 млн лет должно быть потеряно примерно 5–6 % рения. Прежде чем использовать молибденит для датирования, необходимо убедиться, что минерал не изменен поздними процессами. В противном случае полученные значения возраста окажутся недостоверными.

Для цитирования

Калинин А. А. и др. Сравнение изотопных данных, полученных Sm-Nd и Re-Os методами для минералов и пород рудопрооявления Озерное Салла-Куоляярвинской зоны. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 1. С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-5-13>.

Comparison of isotope data obtained with Sm-Nd and Re-Os methods for minerals and rocks from the Ozerne ore occurrence, Salla-Kuolajarvi belt

Arkadiy A. Kalinin*, Tat'yana V. Kaulina, Pavel A. Serov

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Article info

Received
24.12.2020;
received in revised
01.03.2021

Key words:

Salla-Kuolajarvi belt,
albitite,
molybdenite,
rhenium,
Sm-Nd method,
Rb-Sr method,
Re-Os method,
dating

Abstract

Sm-Nd isochrone, drawn for rock-forming and sulfide minerals from the Ozerne ore occurrence, indicates albitite age of $1,759 \pm 11$ Ma. It shows synchronous formation of albitite and sulfide mineralization, and fully corresponds to the earlier defined age of rutile in albitite ($1,757 \pm 7$ Ma U-Pb, $n = 3$, MSWD = 0.2), and Rb-Sr isochrone age $1,754 \pm 39$ Ma for biotite, apatite, albite, and WR. Recently published Re-Os ages of molybdenite $1,872 \pm 23$ Ma and chalcopyrite $1,891 \pm 230$ Ma indicate more ancient age of sulfide mineralization. These figures are in conflict with the age of rock-forming minerals, defined with Sm-Nd and Rb-Sr methods. The possibility of use of molybdenite from the Salla-Kuolajarvi belt for rock dating has been considered, and low reliability of Re-Os method for it has been shown. The reasons are the following: 1) extremely uneven distribution of Re in molybdenite, where Re content varies 1 wt.% even within one and the same grain, and 2) openness of the Re-Os system after molybdenite crystallization, Re is molybdenized and partly removed from the mineral in the zone of hypergenesis. Removal of Re from molybdenite promotes erroneous ancient age of the molybdenite. According to the equations of radioactive decay, the age would be 110–130 Ma bigger if 5–6 % of Re is taken away. The conclusion is that molybdenite must be studied in detail, proved to be homogenous and unaltered, before it is used for Re-Os dating. In the other case the results will be not reliable.

For citation

Kalinin, A. A. et al. 2021. Comparison of isotope data obtained with Sm-Nd and Re-Os methods for minerals and rocks from the Ozerne ore occurrence, Salla-Kuolajarvi belt. *Vestnik of MSTU*, 24(1), pp. 5–13. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-5-13>.

Введение

Салла-Куоляярвинская структура располагается в центральной части Лапландской системы раннепротерозойских зеленокаменных поясов, прослеживающейся от северной части Норвегии и Швеции через территорию Финляндии до Заонежья в Республике Карелия. Восточная часть Салла-Куоляярвинской структуры находится на территории России, западная – в Финляндии, где ее именуют Salla belt (пояс Салла). Супракрупальные толщи в пределах российской части структуры имеют возраст от ятулия до людиковия (2,3–1,92 млрд лет) (Воинов и др., 1985).

На восточном фланге раннепротерозойской Салла-Куоляярвинской зоны установлена серия урановых рудопроявлений, связанных со щелочно-карбонатными метасоматитами (альбититами) (Калинин, 2018) (рис. 1). Некоторые из них содержат минерализацию молибденита, золота, теллуридов и селенидов, наиболее богатая минерализация обнаружена в рудопроявлении Озерном.

Альбититы рудопроявления Озерного были датированы U-Pb и Rb-Sr методами (Калинин и др., 2015a). Для рутила из альбититов был получен U-Pb возраст 1757 ± 7 млн лет ($n = 3$, СКВО = 0,2); Rb-Sr изохрона для биотита, апатита, альбита и породы в целом определила возраст альбититов в 1754 ± 39 млн лет. Близкий возраст (1728 ± 39 млн лет) был получен Sm-Nd методом для амфибол-карбонат-альбит-кварцевых метасоматитов рудопроявления Алим-Курсуярви, расположенного в 12 км к северу от Озерного (Калинин и др., 2015a) (рис. 1). Согласованность данных, полученных разными методами, говорит о том, что полученные значения возраста отражают время образования метасоматических пород, формировавшихся при низкой температуре, не выше 300–350 °C (Калинин и др., 2015a). Совпадающий в пределах ошибки U-Pb возраст даек гранитов из Салла-Куоляярвинской зоны 1,75 млрд лет (Колядина, 2017) позволяет предположить, что именно эти граниты служили магматическим источником метасоматических растворов.

Более поздние данные (Коваль и др., 2019), полученные Re-Os методом по молибдениту и халькопириту 1872 ± 23 и 1891 ± 230 млн лет соответственно, указывают на существенно более древний возраст сульфидной минерализации рудопроявления Озерного, что противоречит возрасту породообразующих минералов, полученных Sm-Nd и Rb-Sr методами, и требует разъяснения. Цель статьи – сравнение достоверности Re-Os и Sm-Nd данных.

Материалы и методы

Определение содержания и изотопных составов Sm и Nd выполнено в Геологическом институте КНЦ РАН (г. Апатиты) по методике, рассмотренной в монографии Т. Б. Баяновой (2004). Среднее значение отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте JNdi-1 за период измерений составило $0,512090 \pm 13$ ($N = 9$). Ошибка в $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ отношениях составляет 0,4 % (2σ) – среднее значение из 7 измерений в стандарте BCR-2 (Raczek et al., 2003). Погрешность измерения изотопного состава Nd в индивидуальном анализе – до 0,005 %. При расчете изохрон использовались реальные ошибки измерения изотопного состава Nd, но не ниже уровня воспроизводимости измерения изотопного состава Nd (0,004 %). Холостое внутрилабораторное загрязнение по Nd равно 0,3 нг, по Sm – 0,06 нг. Точность определения концентраций Sm и Nd $\pm 0,5$ %, для минералов с низкими содержаниями (доли ppm) – до ± 10 %. Изотопные отношения были нормализованы по отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$, а затем пересчитаны на отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте JNdi-1 = 0,512115 (Tanaka et al., 2000). Вычисление параметров изохрон проводилось с помощью программного комплекса ISOPLOT (Ludwig, 2008). При расчете величин $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ и модельных возрастов $T_{(\text{DM})}$ использованы современные значения CHUR по (Bouvier et al., 2008) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512630$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1960$ и DM по (Goldstein et al., 1988) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,513151$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,2136$. Для учета возможного фракционирования Sm и Nd во внутрикоровых процессах для исследованных пород были рассчитаны двустадийные Nd модельные возрасты $T_{\text{Nd}}(\text{DM}-2\text{st})$ (Keto et al., 1987) с использованием среднекорового отношения $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,12$ (Taylor et al., 1985).

Геологическое положение рудоносных альбититов

На восточном фланге Салла-Куоляярвинской зоны (рис. 1) альбититы развиваются по метаосадочным и по основным метавулканическим породам (апосланцевые и апобазитовые метасоматиты соответственно) кясиярвинской, куоляярвинской, юрхьяярвинской и нилуттияярвинской свит ятулия (Калинин, 2018; Коваль и др., 2019). Минерализованные карбонат-альбитовые метасоматиты связаны с системой разломов, секущих супракрупальные толщи в северо-восточном – субширотном направлении. Наиболее богатая золото-теллуридная и молибденовая минерализация установлена в урановом рудопроявлении Озерном, расположенном в пределах толщи амфиболитов нилуттияярвинской свиты (метавулканиты основного состава и габбродолериты) (Калинин, 2018; Калинин и др., 2014a; b). Карбонат-альбитовые метасоматиты приурочены к тектонической зоне, секущей амфиболиты под углом около 50° к простиранию толщи. Метасоматиты образуют кулисообразную серию линз размером до 90 × 10 м с простиранием 30°СВ. Общая мощность зоны альбитизации до 30 м, она прослеживается в северо-восточном направлении на 270 м (Калинин и др., 2014b).

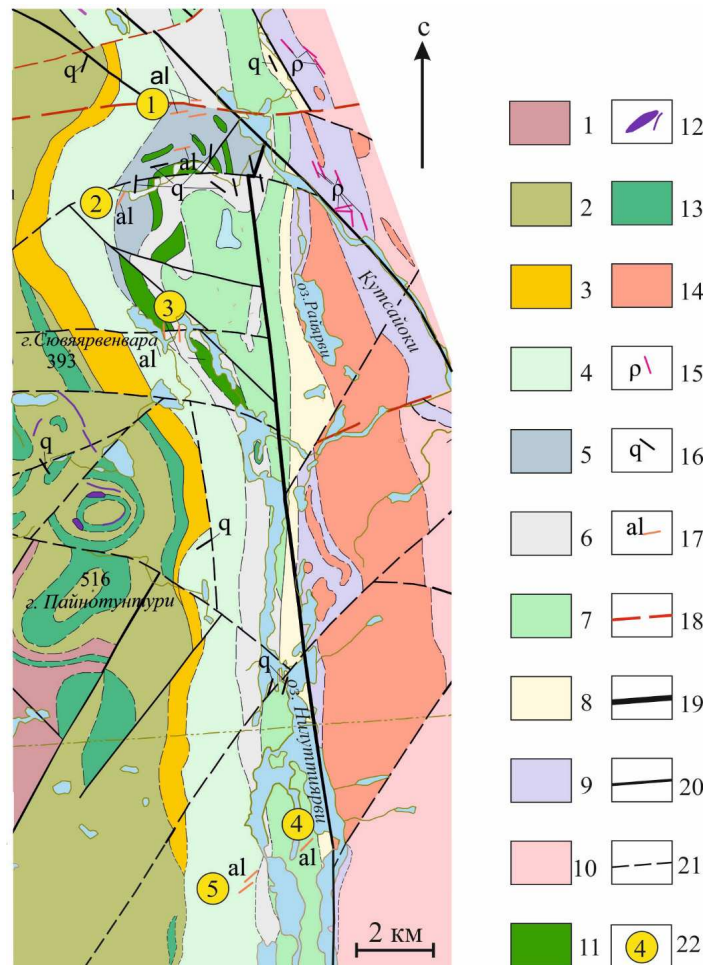


Рис. 1. Схема геологического строения восточного фланга Салла-Куолаярвинской зоны (Калинин, 2018).

- Условные обозначения: 1 – кайларская свита (кварцитопесчаники, туфопесчаники, доломиты); 2 – апарярвинская свита (метабазальты, метамандельштейны); 3 – ноукаярвинская свита (кварцевые песчаники, полимиктовые конгломераты, эпидот-биотит-кварцевые сланцы); 4 – кясияярвинская свита (метабазальты, метаандезиты); 5 – куонаярвинская свита (флишоидная толща – алевролиты, аркозовые песчаники, доломиты, углеродистые сланцы); 6 – юрхямярвинская свита (кварцитопесчаники, доломиты, известняки, прослойки филлитов); 7 – нилуттиярвинская свита (плагиосланцы по метабазальтам и метаандезитам, амфиболиты); 8 – ниваяярвинская свита (кварциты, кварцитопесчаники, филлитовидные сланцы, конгломераты); 9 – челозерская свита (сланцеватые амфиболиты, гранат-биотит-амфиболовые и ставролит-биотитовые сланцы, слюдястые сланцы, кварциты); 10 – беломорский метаморфический комплекс (плагиогнейсы и амфиболиты, в разной степени гранитизированные); 11–12 – куолаярвинский комплекс габбро-перидотитов: 11 – габбро, пироксениты; 12 – перидотиты, оливиниты пироксеновые; 13 – панаяярвинский комплекс лейкократовых габбро; 14 – гнейсограниты, мигматит-граниты; 15 – пегматитовые жилы; 16 – жилы кварцевые; 17 – альбититы; 18–21 – тектонические нарушения (разломы): 18 – активизированные в палеозое; 19 – главные; 20 – прочие достоверные; 21 – прочие, предполагаемые; 22 – участки альбититов с минерализацией урана; 1 – Алим-Курсуярви; 2 – Илим-Курсуярви; 3 – Алакурти; 4 – Озерное; 5 – Лагерное.

Штрих-пунктирная линия – граница Мурманской области и Республики Карелии

Fig. 1. Schematic geological map of the eastern flank of the Salla-Kuolajarvi belt (Kalinin, 2018).

- Legend: 1 – the Kailarskaya unit (quartz sandstone, tuffaceous sandstone, dolomite); 2 – the Apajarvinskaya unit (metabasalt, metamandelstein); 3 – the Noukajarvinskaya unit (quartz sandstone, polymictic conglomerate, quartz-biotite-epidote schist); 4 – the Kyasjarvinskaya unit (metabasalt, metaandesite); 5 – the Kuonajarvinskaya unit (flysch rocks – siltstone, arcose sandstone, dolomite, carbonaceous schist); 6 – the Jurhyamyajarvinskaya unit (quartz sandstone, dolomite, limestone, phyllite); 7 – the Niluttjarvinskaya unit (plagiogneiss after metabasalt and metaandesite, amphibolite); 8 – the Nivajarvinskaya unit (quartzite, quartz sandstone, phyllite, conglomerate); 9 – the Chelozerskaya unit (schistose amphibolite, amphibole-biotite-garnet and biotite-staurolite schists, micaceous schist, quartzite); 10 – the Belomorian metamorphic complex (granitized plagiogneiss and amphibolite); 11–12 – the Kuolajarvi complex of gabbro-peridotite: 11 – gabbro, pyroxenite; 12 – peridotite, pyroxene olivinite; 13 – the Panajarvi complex of leucocratic gabbro; 14 – gneiss-granite, migmatitic granite; 15 – pegmatite veins; 16 – quartz veins; 17 – albitite; 18–21 – faults: 18 – activated in the Paleozoic; 19 – main faults; 20 – other plausible faults; 21 – other supposed faults; 22 – uranium occurrences in albitite: 1 – Alim-Kursujarvi; 2 – Ilim-Kursujarvi; 3 – Alakurti; 4 – Ozernoje; 5 – Lagernoje.
 The dash-dotted line – the boundary of the Murmansk region and Karelia

Тела метасоматитов – зональные. Во внешней зоне амфиболиты интенсивно эпидотизированы. Следующая зона – зона актинолитизации, хлоритизации и биотитизации амфиболитов. Центральная часть сложена альбитовыми и альбит-доломитовыми метасоматитами. Последние образуют в альбититах гнезда неправильной формы и прожилки мощностью до 20 см. По контакту альбит-доломитовых метасоматитов с альбититами прослеживается тонкая (до 2 мм) кайма хлорит-биотитового состава с урановыми минералами. Тыловая зона, сложенная карбонат-кварцевыми и кварцевыми метасоматитами, выявлена на рудопроявлении только в одной из линз альбититов.

В составе сульфидной минерализации рудопроявления Озерного установлены (в порядке уменьшения частоты встречаемости) пирит, халькопирит, молибденит, марказит, мелонит, алтаит, фробергит, клаусталит, маттагамит, минералы ряда кавацулит – скиппенит, в качестве минералогических редкостей отмечены раклиджит, цумоит, сильванит, колорадоит, богдановичит, поубаит, бамболлаит (Калинин и др., 2015б). В самородном виде встречаются золото и теллур. Среди минералов-оксидов в измененных амфиболитах внешних зон преобладают магнетит и ильменит, а в центральных частях тел метасоматитов – гематит и рутил. Минералы урана представлены уранинитом, уранофаном, давидитом и браннеритом.

Результаты и обсуждение

Авторами было продолжено датирование пород и рудной минерализации рудопроявления Озерного с прямым датированием сульфидных минералов Sm-Nd методом. Подход с применением сульфидных минералов в качестве Sm-Nd геохронометров уже был успешно использован для ряда рудных объектов и позволил установить на них главные рубежи рудообразования (Екимова и др., 2011; Серов и др., 2009; Чащин и др., 2016). Для Sm-Nd датирования из альбититов рудопроявления Озерного выделены породообразующие (альбит, доломит, хлорит) и сульфидные (халькопирит, молибденит) минералы.

Результаты Sm-Nd датирования альбититов приведены на рис. 2, а, б и в таблице. Изохрона, построенная по породообразующим и сульфидным минералам, определяет возраст 1759 ± 11 млн лет, что, во-первых, полностью согласуется с полученным ранее возрастом альбититов, во-вторых, говорит о синхронности образовании альбититов и сульфидной минерализации. Аналитическая точка хлорита не лежит на изохроне, подтверждая наложенный характер процессов хлоритизации (Калинин и др., 2015а). Рассчитанный отдельно возраст сульфидных минералов (рис. 2, б) полностью согласуется с возрастом породообразующих минералов, хотя и отличается большей ошибкой в связи с меньшим количеством точек на изохроне.

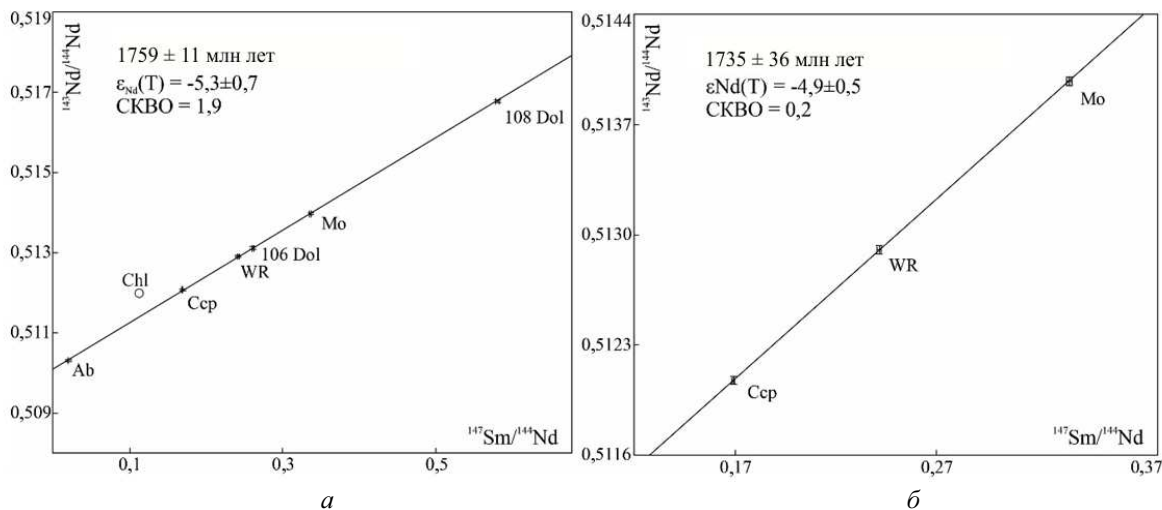


Рис. 2. Sm-Nd изохроны для альбититов рудопроявления Озерное: а – изохрона по породе (WR), породообразующим минералам (альбит – Ab, доломит – Dol, хлорит – Chl) и сульфидным минералам (халькопирит – Ccp, молибденит – Mo); б – изохрона по породе и сульфидным минералам

Fig. 2. Sm-Nd isochrones for albite of the Ozerное ore occurrence: а – isochrone for the rock (WR), rock-forming (albite – Ab, dolomite – Dol, chlorite – Chl) and sulfide (chalcopyrite – Ccp, molybdenite – Mo) minerals; б – isochrone for the rock and sulfide minerals

Высокая достоверность полученных Sm-Nd методом данных определяется относительно высоким содержанием Sm и Nd в породах и минералах и малой мобильностью редких земель при наложенных процессах (Фоп, 1989). Кроме того, температуры закрытия Sm-Nd системы в большинстве минералов достаточно высокие – до 700°C (Kaulina, 2012), что позволяет датировать даже высокотемпературные метаморфические процессы. В этом отношении можно сомневаться в данных датирования Rb-Sr методом, поскольку температура закрытия этой изотопной системы низкая, а крупноионные элементы Rb и Sr мобильны при

метасоматических процессах. Но в данном случае Rb-Sr система подходит для датирования процессов метасоматоза, так как температура формирования метасоматических пород была относительно низкой – не выше 300–350 °С (Калинин и др., 2015а). Совпадение U-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd данных говорит о кристаллизации пород и минералов при температуре ниже температуры закрытия изотопных систем (Kaulina, 2012). Таким образом, время формирования альбититов и минерализации в них, равное 1759 ± 11 млн лет, не вызывает сомнения.

Таблица. Изотопные Sm-Nd данные для альбититов рудопоявления Озерное
 Table. Isotope Sm-Nd data for albitite of the Ozernoe ore occurrence

Фракция	Концентрация, мкг/г		Изотопные отношения		T _{DM} , млн лет	ε _{Nd} (T)
	Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd		
WR	2,66	6,01	0,2416	0,512905 ± 11	2 677	-5,0
Сср	0,762	2,72	0,1693	0,512072 ± 12		
Mo	5,85	10,52	0,3360	0,513974 ± 9		
106 Dol	0,995	2,30	0,2614	0,513110 ± 9		
108 Dol	7,14	7,44	0,5797	0,516781 ± 7		
Ab	0,267	7,98	0,0202	0,510307 ± 22		
Chl	0,104	1,035	0,1112	0,511985 ± 24		

Если считать, что определение возраста сульфидных минералов Sm-Nd методом ошибочно, и Re-Os возраст более подходит для определения времени формирования сульфидной минерализации, то мы сразу наталкиваемся на противоречие: возраст молибденита и халькопирита рудопоявления Озерного оказывается древнее возраста вмещающей породы, что не согласуется с геологическими и минералогическими данными.

Молибденит рудопоявления Озерного отличается высоким содержанием примесей селена (до 16 мас.%) и рения (до 1,2 мас.%), причем примеси в минерале распределены неравномерно (Калинин и др., 2013). Сходный по составу молибденит с высоким содержанием Se и Re выявлен также на рудопоявлении Алакуртти. Предполагается наличие такого же молибденита на рудопоявлении Алим-Курсуярви, где в породе установлено повышенное содержание селена и молибдена (Калинин, 2018), отмечен селенсодержащий повеллит (Карнов и др., 2012), но состав молибденита пока не изучен.

Содержание примеси рения в пределах зерен молибденита рудопоявления Озерного может колебаться более чем на 1 мас.%, и каких-либо закономерностей в его распределении не выявлено (Калинин и др., 2013). Установлена тенденция, что повышенное содержание рения характерно для молибденитов с преобладанием 3R поли типа, и это соответствует данным R.J.J. Newberry (1979а; б) для молибденитовых месторождений мира.

Вариации содержания рения в навесках молибденита отмечены и в работе Ковалева А. В. с соавторами (Коваль и др., 2019), где сказано: "в молибдените содержание рения варьирует от 7–10 до 480–560 ppm, что приводит к вариациям модельного возраста от 1 673 до 1 943 млн лет".

Известно, что молибденит может перекристаллизовываться при поздних гидротермально-метасоматических процессах: метастабильный поли тип 3R сменяется стабильным поли типом 2H, и при этом происходит вынос из минерала рения (Newberry, 1979а; б). Кроме того, молибденит изменяется в условиях гипергенеза, что также приводит к выносу рения и к нарушению Re-Os системы, хотя при этом перекристаллизации молибденита не происходит (Newberry, 1979а; б; McCandless et al., 1993). На порфириновых месторождениях Чили отмечалось увеличение содержания рения в молибдените с глубиной (Newberry, 1979а; б), аналогичная тенденция выявлена на молибден-порфириновом месторождении Лобаш в Центральной Карелии (Богачев и др., 2013). Это тоже может указывать на вынос рения из молибденитов в приповерхностных условиях. На подвижность рения в экзогенных условиях в окислительной обстановке (вне связи с молибденитом) указывал также Н. К. Чертко (Чертко, 2008).

В гипергенных условиях молибденит замещается повеллитом. Повеллит обнаружен на рудопоявлениях Алим-Курсуярви, Алакуртти и Озерное. Выявлено две морфологические разновидности повеллита (Карнов и др., 2012). Первая – сноповидные агрегаты темно-зеленого цвета размером 1–2 мм, которые содержат реликты молибденита. Вторая представляет собой тонкочешуйчатые агрегаты светло-зеленой окраски либо землистую массу. Вторая разновидность развивается по трещинам в породе. Повеллит наследует (частично) от исходного молибденита повышенное содержание селена: 6,8 мас.% в молибдените и 2,4 мас.% в развивающемся по нему повеллите (Калинин, 2018; Карнов и др., 2012). При окислении селенсодержащего молибденита селен переходит в позицию Mo⁶⁺. Примесь рения в повеллите, развивающемся по молибдениту с содержанием Re 0,14 мас.%, оказалась ниже чувствительности микронзондового анализа, т. е. рений при замещении молибденита повеллитом также выносятся.

Важным требованием к геохронологическим исследованиям является закрытый характер системы в отношении изучаемых изотопов со времени кристаллизации минерала (Фоп, 1989). Молибденит в Mo-U рудопоявлениях Салла-Куоляярвинской зоны, очевидно, изменен в низкотемпературных гидротермальных

и в приповерхностных условиях, при этом есть признаки выноса из минерала элементов-примесей (селена и рения).

Вынос рения "воспринимается" Re-Os системой как более длительное существование минерала, поскольку остается меньше родительского элемента. В нашем случае вынос рения отражается в получении древнего возраста 1,87–1,89 млрд лет (*Коваль и др., 2019*) по сравнению с более реальным, на наш взгляд, значением – 1,75–1,76 млрд лет. Исходя из уравнения радиоактивного распада и периода полураспада рения, для кажущегося увеличения возраста на 110–130 млн лет (как в нашем случае) должно быть потеряно примерно 5–6 % рения.

Статистика Re-Os данных по молибдениту не столь значительна, чтобы делать "глобальные" выводы о достоверности метода для данного минерала. В мировой литературе идет активная дискуссия по этому вопросу (*McCandless et al., 1993; Suzuki et al., 2000; Stein et al., 2001; Barra et al., 2017; Högalm et al., 2019 и др.*). Но для примера можно привести данные, полученные по молибденитам Карелии (*Богачев и др., 2013*). На молибден-порфириновом месторождении Лобаш изохронный возраст молибденита составил 2726 ± 36 млн лет, возраст лейкогранитов равен 2715 ± 13 млн лет, а гранодиоритов – 2704 ± 10 млн лет. На Ялонваарском золото-медно-молибденовом месторождении Re-Os возраст молибденита из кварцевых жил 2760 ± 38 млн лет, а U-Pb возраст гранитов рудоносного комплекса 2746 ± 9 млн лет. На золото-порфириновом рудопроявлении Алату Re-Os возраст молибденита из кварцевожильной зоны равен 1914 ± 34 млн лет, при этом U-Pb возраст пород продуктивной габбро-плагиогранитной ассоциации $1884,8 \pm 3,3$ – 1872 ± 13 млн лет (*Богачев и др., 2013*). Мы видим, что на всех месторождениях Re-Os возраст молибденитов в пределах ошибок соответствует U-Pb цирконовым возрастам рудоносных гранитов. Но при этом Re-Os значения более древние, чем те, что получены для вмещающих минерализацию гранитоидов. Поскольку нередко формирование минерализации по времени оторвано от процессов кристаллизации магматического очага, то следовало бы ожидать не более "древние", а более "молодые" значения возраста рудных минералов.

Заключение

Возможность использования молибденита из рудопроявлений Салла-Куоляярвинской зоны для датирования Re-Os методом вызывает сомнение по следующим причинам:

- во-первых, в связи с весьма неоднородным распределением рения в молибдените, когда вариации содержания рения в некоторых случаях превышают 1 мас.% даже в пределах одного зерна;
- во-вторых, в связи с выносом рения из молибденита при его изменении в приповерхностных условиях;
- в-третьих, из-за замещения молибденита повеллитом в гипергенных условиях, что также сопровождается выносом рения.

Как видно из приведенных выше результатов сравнения, вынос рения из молибденита способствует "удревнению" возраста, определяемого Re-Os методом. В связи с этим перед использованием молибденита для датирования необходимо убедиться, что минерал не изменен поздними процессами, в противном случае полученные значения возраста окажутся недостоверными.

Благодарности

Работа выполнена в рамках тем НИР № 0226-2019-0053 и 0226-2019-0052.

Авторы благодарны всем сотрудникам группы сепарации вещества Геологического института КНЦ РАН и инженерам лаборатории золота и других высоколиквидных полезных ископаемых В. И. Басалаевой и А. Б. Калачевой за помощь в подготовке монофракций минералов для исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Баянова Т. Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма / под ред. Ф. П. Митрофанова. СПб. : Наука, 2004. 174 с.
- Богачёв В. А., Беляцкий Б. В., Гольцин Н. А., Иваников В. В. [и др.]. Изохронный Re-Os возраст молибденитов раннедокембрийских порфириновых месторождений Карелии // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География. 2013. № 2. С. 3–20.
- Воинов А. С., Полеховский Ю. С. Стратиграфия нижнего протерозоя Пана-Куоляярвинской структурной зоны (Северная Карелия) // Стратиграфия нижнего докембрия Карело-Кольского региона : сб. ст. Л., 1985. С. 96–106.
- Екимова Н. А., Серов П. А., Баянова Т. Б., Елизарова И. Р. [и др.]. Распределение РЗЭ в сульфидных минералах и Sm-Nd датирование рудогенеза расслоенных базитовых интрузий // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436, № 1. С. 75–78.
- Калинин А. А. Золото в метаморфических комплексах северо-восточной части Фенноскандинавского щита. Апатиты : КНЦ РАН, 2018. 250 с.

- Калинин А. А., Каулина Т. В., Лялина Л. М., Елизаров Д. В. [и др.]. Этапы формирования урановой минерализации Салла-Куоляярвинской зоны (Северная Карелия): геологические и изотопно-геохронологические данные // Записки РМО. 2015а. Т. 144, № 2. С. 99–108.
- Калинин А. А., Савченко Е. Э. Новые данные по минералогии селена и теллура на молибден-урановом рудопроявлении Озерное // Наука и образование : материалы междунар. науч.-практ. конф., Мурманск, 30 октября 2015 г. Мурманск : МГТУ, 2015а. С. 82–88.
- Калинин А. А., Савченко Е. Э., Селиванова Е. А. Минерализация Se и Te в альбититах и перспективы золотоносности метасоматитов Салла-Куоляярвинской зоны, Северная Карелия // Доклады Академии наук. 2014а. Т. 455, № 1. С. 58–61. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0869565214070159>.
- Калинин А. А., Савченко Е. Э., Селиванова Е. А. Рений- и селенсодержащий молибденит рудопроявления Озерное в Салла-Куоляярвинской зоне, Северная Карелия // Записки РМО. 2013. Т. 142, № 6. С. 104–114.
- Калинин А. А., Савченко Е. Э., Селиванова Е. А., Полюховский Ю. С. [и др.]. Кавацулит $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ и скиппенит Bi_2TeSe_2 в альбититах Салла-Куоляярвинской зоны, Северная Карелия, Россия // Записки РМО. 2014b. Т. 143, № 2. С. 80–94.
- Карпов С. М., Волошин А. В., Калинин А. А., Савченко Е. Э. Повеллит в альбит-карбонатных метасоматитах Салла-Куоляярвинской зоны // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона : Труды IX Всерос. (с междунар. участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 60-летию Геологического института КНЦ РАН, Апатиты, 2–3 апреля 2012 г. Апатиты : Изд-во К&М, 2012. С. 261–263.
- Коваль А. В., Богачев В. А., Петров С. В. Особенности рудной минерализации золотоурановых рудопроявлений Озерное и Лагерное Куоляярвинской структуры (Северная Карелия) // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 1. С. 23–35. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-23-35>.
- Колядина А. И. Структурно-вещественные закономерности размещения золото-урановой минерализации Куоляярвинской структуры (Северная Карелия) : дис ... канд. геол.-мин. наук : 25.00.11. СПб., 2017. 159 с.
- Серов П. А., Екимова Н. А. Возможности Sm-Nd датирования рудных процессов с использованием сульфидов // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 3. С. 456–460.
- Фор Г. Основы изотопной геологии / пер. с англ. М. : Мир, 1989. 590 с.
- Чашин В. В., Баянова Т. Б., Митрофанов Ф. П., Серов П. А. Малосульфидные платинометалльные руды палеопротерозойского Мончегорского плутона и его южного обрамления (Кольский полуостров, Россия): геологическая характеристика и изотопно-геохронологические свидетельства полихронности рудно-магматических систем // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 1. С. 41–63. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016777016010020>.
- Чертко Н. К. Геохимия. Минск : БГУ, 2008. 170 с.
- Barra F., Deditius A., Reich M., Kilburn M. R. [et al.]. Dissecting the Re-Os molybdenite geochronometer // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Article number: 16054. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16380-8>.
- Bouvier A., Vervoort J. D., Patchett P. J. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets // Earth and Planetary Science Letters. 2008. Vol. 273, Iss. 1–2. P. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>.
- Goldstein S. J., Jacobsen S. B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution // Earth and Planetary Science Letters. 1988. Vol. 87, Iss. 3. P. 249–265. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90013-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90013-1).
- Hogmalm K. J., Dahlgren I., Fridolfsson I., Zack T. First in situ Re-Os dating of molybdenite by LA-ICP-MS/MS // Mineralium Deposita. 2019. Vol. 54. P. 821–828. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00889-1>.
- Kaulina T. V. Thermochronology of eclogitic rocks of the Kola Peninsula // Вестник МГТУ. 2012. Т. 15, № 2. С. 342–349. URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v15_2_n48/articles/342_348_kaulina.pdf.
- Keto L. S., Jacobsen S. B. Nd and Sr isotopic variations of Early Paleozoic oceans // Earth and Planetary Science Letters. 1987. Vol. 84, Iss. 1. P. 27–41. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90173-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90173-7).
- Ludwig K. R. ISOPLOT/Ex – A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Version 3.6 // Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2008. № 4. 76 p.
- McCandless T. E., Ruiz J., Campbell A. R. Rhenium behavior in molybdenite in hypogene and near-surface environments: Implications for Re-Os geochronometry // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1993. Vol. 57, Iss. 4. P. 889–905. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90176-W](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90176-W).
- Newberry R. J. J. Polytypism in molybdenite (I): A non-equilibrium impurity-induced phenomenon // American Mineralogist. 1979a. Vol. 64. P. 758–767.
- Newberry R. J. J. Polytypism in molybdenite (II): Relationships between polytypism, ore deposition/alteration stages and rhenium contents // American Mineralogist. 1979b. Vol. 64. P. 768–775.
- Raczek I., Jochum K. P., Hofmann A. W. Neodymium and strontium isotope data for USGS reference materials BCR-1, BCR-2, BHVO-1, BHVO-2, AGV-1, AGV-2, GSP-1, GSP-2 and eight MPI-DING reference glasses // Geostandards and Geoanalytical Research. 2003. Vol. 27, Iss. 2. P. 173–79. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2003.tb00644.x>.

- Stein H. J., Markey R. J., Morgan J. W., Hannah J. L. [et al.]. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works // *Terra Nova*. 2001. Vol. 13, Iss. 6. P. 479–486. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00395.x>.
- Suzuki K., Kagi H., Nara M., Takano B. [et al.]. Experimental alteration of molybdenite: Evaluation of the Re-Os system, infrared spectroscopic profile and polytype // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000. Vol. 64, Iss. 2. P. 223–232. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00291-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00291-4).
- Tanaka T., Togashi S., Kamioka H., Amakawa H. [et al.]. JNd1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium // *Chemical Geology*. 2000. Vol. 168, Iss. 3–4. P. 279–281. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00198-4).
- Taylor S. R., McLennan S. M. The continental crust: Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell : Oxford, 1985. 312 p.

References

- Bayanova, T. B. 2004. Age of referential geological complexes of the Kola Peninsula and duration of the magmatic processes. Sankt-Peterburg. (In Russ.)
- Bogachev, V. A., Belyatsky, B. V., Goltsin, N. A., Ivanikov, V. V. et al. 2013. Re-Os molybdenite isochron age for early Precambrian porphyry deposits in Karelia. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Ser. 7. Geology. Geography*, 2, pp. 3–20. (In Russ.)
- Voinov, A. S., Polekhovskiy, Yu. S. 1985. Stratigraphy of the Lower Proterozoic in the Pana-Kuolajarvinskaya zone, Northern Karelia. In coll. articles *Stratigraphy of the Lower Precambrian of the Karelian and Kola region*. Leningrad, pp. 96–106. (In Russ.)
- Ekimova, N. A., Serov, P. A., Bayanova, T. B., Elizarova, I. R. et al. 2011. New data on distribution of REEs in sulfide minerals and Sm-Nd dating of ore genesis of layered basic intrusions. *Doklady Akademii nauk*, 436(1), pp. 75–78. (In Russ.)
- Kalinin, A. A. 2018. Gold in metamorphic complexes in the North-Eastern part of the Fennoscandian Shield. Apatity. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Kaulina, T. V., Lyalina, L. M., Elizarov, D. V. et al. 2015a. Stages in formation of uranium mineralization in the Salla-Kuolajarvi belt (Northern Karelia). *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 144(2), pp. 99–108. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Savchenko, Ye. E. 2015a. New data on mineralogy of selenium and tellurium in the uranium-molybdenum occurrence Ozernoe. Proceedings of the Intern. scien.-practical conf. *Science and education*. 30 October, 2015. Murmansk, pp. 82–88. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Savchenko, Ye. E., Selivanova, E. A. 2014a. Se and Te mineralization in albitite and prospects for gold mineralization in metasomatites in the Salla-Kuolajarvi belt, Northern Karelia. *Doklady Akademii nauk*, 455(1) pp. 58–61. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0869565214070159>. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Savchenko, Ye. E., Selivanova, E. A. 2013. Rhenium and Selenium-bearing molybdenite from the Ozernoe occurrence in the Salla-Kuolajarvi belt, Northern Karelia. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 142(6), pp. 104–114. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Savchenko, Ye. E., Selivanova, E. A., Polekhovskiy, Yu. S. et al. 2014b. Kawazulite Bi₂Te₂Se and skippenite Bi₂TeSe₂ in albitite from the Salla-Kuolajarvi belt, Northern Karelia, Russia. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 143(2), pp. 80–94. (In Russ.)
- Karpov, S. M., Voloshin, A. V., Kalinin, A. A., Savchenko Ye. E. 2012. Powellite Ca[MoO₄] in the carbonate-albite metasomatites of the Salla-Kuolajarvi belt. In coll. articles *Geology and strategic minerals of the Kola region*. 2–3 April, 2012. Apatity, pp. 261–263. (In Russ.)
- Koval, A. V., Bogachev, V. A., Petrov, S. V. 2019. Specific features of ore mineralization of uranium-gold ore occurrences Ozernoe and Lagernoe in the Kuolajarvi structure (Northern Karelia). *Vestnik of MSTU*, 22(1), pp. 23–35. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-23-35>. (In Russ.)
- Kolyadina, A. I. 2017. Structural-substantive regulations of distribution of uranium-gold mineralization in the Kuolajarvi structure (Northern Karelia). Ph.D. Thesis. Saint Peterburg. (In Russ.)
- Serov, P. A., Ekimova, N. A. 2009. On the possibility of Sm-Nd dating of ore processes with the use of sulfides. *Vestnik of MSTU*, 12(3), pp. 456–460. (In Russ.)
- Faure, G. 1989. Principles of isotope geology. Moscow. (In Russ.)
- Chashchin, V. V., Bayanova, T. B., Mitrofanov, F. P., Serov, P. A. 2016. Low-sulfide PGE ores in Paleoproterozoic Monchegorsk pluton and massifs of its southern framing, Kola Peninsula, Russia: Geological characteristic and isotopic geochronological evidence of polychronous ore-magmatic systems. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 58(1), pp. 41–63. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016777016010020>. (In Russ.)
- Chertko, N. K. 2008. Geochemistry. Minsk. (In Russ.)
- Barra, F., Deditius, A., Reich, M., Kilburn, M. R. et al. 2017. Dissecting the Re-Os molybdenite geochronometer. *Scientific Reports*, 7. Article number: 16054. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16380-8>.

- Bouvier, A., Vervoort, J. D., Patchett, P. J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2), pp. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>.
- Goldstein, S. J., Jacobsen, S. B. 1988. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: Implications for crustal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 87(3), pp. 249–265. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90013-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90013-1).
- Hogmalm, K. J., Dahlgren, I., Fridolfsson, I., Zack, T. 2019. First in situ Re-Os dating of molybdenite by LA-ICP-MS/MS. *Mineralium Deposita*, 54, pp. 821–828. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00889-1>.
- Kaulina, T. V. 2012. Thermochronology of eclogitic rocks of the Kola Peninsula. *Vestnik of MSTU*, 15(2), pp. 342–349. URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v15_2_n48/articles/342_348_kaulina.pdf.
- Keto, L. S., Jacobsen, S. B. 1987. Nd and Sr isotopic variations of Early Paleozoic oceans. *Earth and Planetary Science Letters*, 84(1), pp. 27–41. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90173-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90173-7).
- Ludwig, K. R. 2008. ISOPLOT/Ex – A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Version 3.6. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4. 76 p.
- McCandless, T. E., Ruiz, J., Campbell, A. R. 1993. Rhenium behavior in molybdenite in hypogene and near-surface environments: Implications for Re-Os geochronometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(4), pp. 889–905. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90176-W](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90176-W).
- Newberry, R. J. J. 1979a. Polytypism in molybdenite (I): A non-equilibrium impurity-induced phenomenon. *American Mineralogist*, 64, pp. 758–767.
- Newberry, R. J. J. 1979b. Polytypism in molybdenite (II): Relationships between polytypism, ore deposition/alteration stages and rhenium contents. *American Mineralogist*, 64, pp. 768–775.
- Raczek, I., Jochum, K. P., Hofmann, A. W. 2003. Neodymium and strontium isotope data for USGS reference materials BCR-1, BCR-2, BHVO-1, BHVO-2, AGV-1, AGV-2, GSP-1, GSP-2 and eight MPI-DING reference glasses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 27(2), pp. 173–79. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2003.tb00644.x>.
- Stein, H. J., Markey, R. J., Morgan, J. W., Hannah, J. L. et al. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works. *Terra Nova*, 13(6), pp. 479–486. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00395.x>.
- Suzuki, K., Kagi, H., Nara, M., Takano, B. et al. 2000. Experimental alteration of molybdenite: Evaluation of the Re-Os system, infrared spectroscopic profile and polytype. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(2), pp. 223–232. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00291-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00291-4).
- Tanaka, T., Togashi, S., Kamioka, H., Amakawa, H. et al. 2000. JNdi-1: A neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chemical Geology*, 168(3–4), pp. 279–281. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00198-4).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Oxford.

Сведения об авторах

Калинин Аркадий Авенирович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Arkadiy A. Kalinin – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol. & Miner.), Senior Researcher; e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Каулина Татьяна Владимировна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический Институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: kaulina@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6530-2187>

Tat'yana V. Kaulina – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Dr Sci. (Geol. & Miner.), Leading Researcher; e-mail: kaulina@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6530-2187>

Серов Павел Александрович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический Институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: serov@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0930-0301>

Pavel A. Serov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol. & Miner.), Senior Researcher; e-mail: serov@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0930-0301>