УДК 550.93:552.32

А.А.САВИЧЕВ
Геолого-разведочный факультет,
аспирант кафедры минералогии,
кристаллографии и петрографии

ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ САМАРИЙ-НЕОДИМОВОГО ДАТИРОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ ЗОЛОТО-ВОЛЬФРАМОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВЕРХНЕ-ЕНАШИМИНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (Енисейский кряж, Сибирь)

Изучены самарий-неодимовые изотопные характеристики в минералах золото-вольфрамовых месторождений Олимпиада, Оленье и грейзенового проявления вольфрама Высокое-2. Изохронный возраст для минерализации дорудной кварц-вольфрамит-шеелитовой, рудной золото-шеелит-сульфидной и пострудной флюорит-карбонатной стадий составляет соответственно 921,2 ± 7,5, 919 ± 93, 915 ± 47 млн лет. Значения ε_{Nd} (T) в минералах варьируют от –1,3 в вольфрамите до –9,3 в шеелите 2, ассоциирующем с золотом, указывая на их коровую природу. Модельные датировки $T(DM$ 2-st) для минералов дорудной (1636-2053 млн лет) и пострудной (1762-1806 млн лет) стадий соотносятся со временем формирования гранитогнейсовых куполов в регионе. Датировка $T(DM$ 2-st) для шеелита 2 (2250-2304 млн лет) отвечает времени образования толеит-базальтовых вулканитов индыглинского комплекса, которые могут рассматриваться как первичный источник золота. Формирование золотого оруденения в интервале 921-915 млн лет является результатом ремобилизации золота из черносланцевых толщ и его переотложением в процессе термально-флюидного воздействия при внедрении гранитоидов татарско-аяхтинского комплекса на рубеже 930-950 млн лет.

Sm-Nd isotope characteristics of minerals from Olympiada and Olenye gold-tungsten deposits and Vysokoye-2 greisen tungsten occurrence are studied. Isochron ages of the pre-ore (quarz-wolframite-scheelite), ore (gold-scheelite-sulphides) and post-ore (fluorite-carbonates) mineralizations are 921,2 ± 7,5, 919 ± 93, 915 ± 47 Ma, accordingly. The values of ε_{Nd} (T) in minerals vary from –1,3 in wolframite to –9,3 in scheelite 2, associated with gold, are characteristic for the crustal formations. The model ages $T(DM$ 2-st) of the pre-ore (1636-2053 Ma) and the post ore stage (1762-1806 Ma) correspond to the time of granit-gneis dome formation. $T(DM$ 2-st) of scheelite 2 (2250-2304 Ma) correlates to the formation time of the Indyglinsky toleite-basalt intrusive complex. It can be assumed as the primary source of gold. The gold mineralization was must probably formed at 921-915 Ma as aresult of goldre-mobilisation from black-schists followed with gold deposition during the thermal fluid alteration influenced by the intruding Tatarsko-Ayakhtinsky granit complex at 930-950 Ma.

Самарий-неодимовый метод позволяет определять абсолютный возраст пород, руд и их возможные источники вещества, что делает актуальным его применение при разработке моделей петро- и рудогенеза. Метод оптимален для датирования пород, претерпевших сложные метаморфические и метасоматические изменения, поскольку самарий и неодим проявляют схожее поведение в таких геохимических обстановках. Самарий и неодим относятся к группе редкоземельных элементов и, вследствие геохимического родства с кальцием, часто концентрируются в его минералах (кальците, флюорите, шеелите и др.).

Золото-шеелит-сульфидное оруденение Верхне-Енашиминского рудного узла локализовано в метасоматически измененных карбонатно-терригенных метаосадочных породах [1, 2]. Сложность геологического

строения района исследований помимо литологических и тектонических факторов определяется разнообразием интрузивных образований, имеющих состав от коматиит-базальтового до лейкогранитового и возраст от архейского до позднерифейского. До настоящего времени окончательно не ясны возраст золотого оруденения и рудогенерирующая роль магматического процесса. Подобные пробелы предполагается устранить в результате настоящих исследований.

В работе изучена геохимия изотопов Sm и Nd в минералах руд золото-вольфрамовых месторождений Олимпиада, Оленье и проявления вольфрама Высокое-2. Схема последовательности образования рудной минерализации этих объектов включает шесть стадий [2]: дорудных метасоматических изменений (I), кварц-вольфрамит-шеелитовую (II), золото-шеелит-сульфидную (III), золото-кварц-полиметаллическую (IV), золото-кварц-антимонитовую (V), пострудную флюорит-карбонатную (VI).

Мономинеральные фракции минералов стадий II (вольфрамит, шеелит 1), III (шеелит 2, цоизит), VI (флюорит, карбонат) проанализированы на многоколлекторном масс-спектрометре «Finngan MAT-261» в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург), аналитик Б.В.Беляцкий. Концентрации элементов определены методом изотопного разбавления с точностью ±1 отн. %. Обработка изотопных данных проведена с использованием пакета Isoplot/Ex 2.49 [4]. Результаты приведены в табл.1.

Самарий и неодим содержат материнские и дочерние изотопы, обусловленные альфа-распадом ^{147}Sm до ^{143}Nd:

$$^{147}_{62}\mathrm{Sm} \rightarrow ^{143}_{60}\mathrm{Nd} + \alpha + Q,\ T_{1/2} = 1{,}06 \cdot 10^{10}\ \text{лет}, \quad (1)$$

где Q – энергия распада; $T_{1/2}$ – период полураспада [4].

Распад ^{147}Sm и накопление ^{143}Nd описываются уравнением

$$\left(\frac{^{143}\mathrm{Nd}}{^{144}\mathrm{Nd}}\right) = \left(\frac{^{143}\mathrm{Nd}}{^{144}\mathrm{Nd}}\right)_i + \frac{^{147}\mathrm{Sm}}{^{144}\mathrm{Nd}}(e^{\lambda t} - 1),\ \lambda = 6{,}54 \cdot 10^{-12}\ \text{год}^{-1}. \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что для системы, состоящей из нескольких генетически связанных фаз, точки, соответствующие отдельным фазам, на графике в координатах ^{147}Sm/^{144}Nd – ^{143}Nd/^{144}Nd будут лежать на прямой линии (изохроне), если система не испытывала никаких изменений изотопных

Таблица 1

Самарий-неодимовые изотопные данные для минералов месторождений Верхне-Енашиминского рудного узла

N п/п	Минерал	Месторождение	Стадия	Sm, ppm	Nd, ppm	Sm/Nd	^{147}Sm/^{144}Nd	^{143}Nd/^{144}Nd ± 2σ	ε_T	$T(DM$ 2-st)
1	Вольфрамит	Высокое-2	II	0,712	0,894	0,80	0,48316	0,514095 ± 16	-2,73	1755
2	Вольфрамит	Высокое-2	II	0,908	0,763	1,19	0,72151	0,515497 ± 21	-1,3	1636
3	Вольфрамит	Высокое-2	II	0,921	1,019	0,90	0,54822	0,514488 ± 18	-2,14	1706
4	Шеелит 1	Высокое-2	II	7,936	35,1	0,23	0,13711	0,511983 ± 12	-6,31	2050
5	Шеелит 1	Высокое-2	II	4,494	21,47	0,21	0,12692	0,511928 ± 14	-6,28	2047
6	Шеелит 1	Высокое-2	II	4,985	24,89	0,20	0,12146	0,511894 ± 19	-6,35	2053
7	Шеелит 2	Оленье	III	3,188	17,68	0,18	0,10934	0,511679 ± 12	-9,23	2290
8	Шеелит 2	Оленье	III	8,277	38,26	0,22	0,13119	0,511826 ± 15	-8,73	2250
9	Шеелит 2	Оленье	III	3,529	13,54	0,26	0,15804	0,511968 ± 14	-8,88	2262
10	Шеелит 2	Олимпиада	III	9,017	49,96	0,18	0,10945	0,511671 ± 17	-9,4	2304
11	Цоизит	Олимпиада	III	2,537	13,51	0,19	0,11388	0,511714 ± 23	-9,04	2275
12	Флюорит	Олимпиада	VI	1,287	4,268	0,30	0,18291	0,512417 ± 20	-2,82	1762
13	Флюорит	Олимпиада	VI	1,992	7,451	0,27	0,16215	0,512287 ± 13	-3,1	1785
14	Флюорит	Олимпиада	VI	1,501	4,232	0,35	0,21494	0,512602 ± 16	-2,69	1751
15	Карбонат	Олимпиада	VI	2,479	11,76	0,21	0,12781	0,512074 ± 22	-3,52	1806
16	Карбонат	Олимпиада	VI	2,005	10,24	0,20	0,11872	0,512032 ± 20	-3,35	1806

отношений, кроме тех, которые были вызваны радиоактивным распадом ^{147}Sm [3]. Точка пересечения изохроны с осью *Y* дает первичное отношение $^{143}Nd/^{144}Nd$, а из наклона изохроны возраст может быть вычислен по формуле

$$t = (1/\lambda)\ln(1 + tg\alpha). \qquad (3)$$

Изотопная эволюция Nd на Земле описывается распадом ^{147}Sm в «однородном хондритовом резервуаре» (CHUR). Отношения $^{143}Nd/^{144}Nd$ в земных образцах могут быть выражены посредством параметра эпсилон ε_t, значение которого определяется сравнением с CHUR. Положительные значения ε означают, что Nd поступал из обедненных мантийных источников, имеющих более высокое отношение Sm/Nd, чем в CHUR, тогда как отрицательные значения ε подразумевают происхождение из коровых обогащенных источников с более низким отношением Sm/Nd, чем в CHUR. Модельные датировки $(T(DM\,2\text{-st}))$ показывают время, прошедшее после того, как Nd в породе имел тот же самый изотопный состав, что и в CHUR, и рассматриваются как оценки длительности пребывания в коре.

Графическая интерпретация полученных данных (рис.1) показывает, что изохроны для минералов стадий II, III, VI имеют близкий угол наклона и, следовательно, возраст, но различаются по начальному отношению $^{143}Nd/^{144}Nd$. Изохронный возраст оруденения составляет 921,2 ± 7,5 млн лет (стадия II), 919 ± 93 млн лет (стадия III), 915 ± 49 млн лет (стадия IV) (рис.2). Ошибка определения возраста зависит от степени разброса экспериментальных точек на изохроне, что определяется степенью вариации отношения Sm/Nd в исследованных минералах (табл.1). К сожалению, значительные ошибки в определении изохронного возраста не позволяют достоверно оценить возрастные интервалы формирования минерализации разных стадий, но, тем не менее, полученные данные не противоречат установленной схеме последовательности минералообразования.

Все исследованные минералы имеют отрицательное значение параметра ε, что может указывать на коровый характер ^{143}Nd (табл.1). Анализ вариации ε в изученных образцах показывает, что значения, наиболее близкие к CHUR (ε = 0), имеют ранние вольфрамиты, генетически связанные с гранитоидами татарско-аяхтинского комплекса. Максимально высокие отрицательные значения ε и, следовательно, максимальная степень контаминации коровым компонентом, характерны для шеелитов 2, которые наиболее тесно связаны с золото-сульфидной минерализацией на изученных месторождениях.

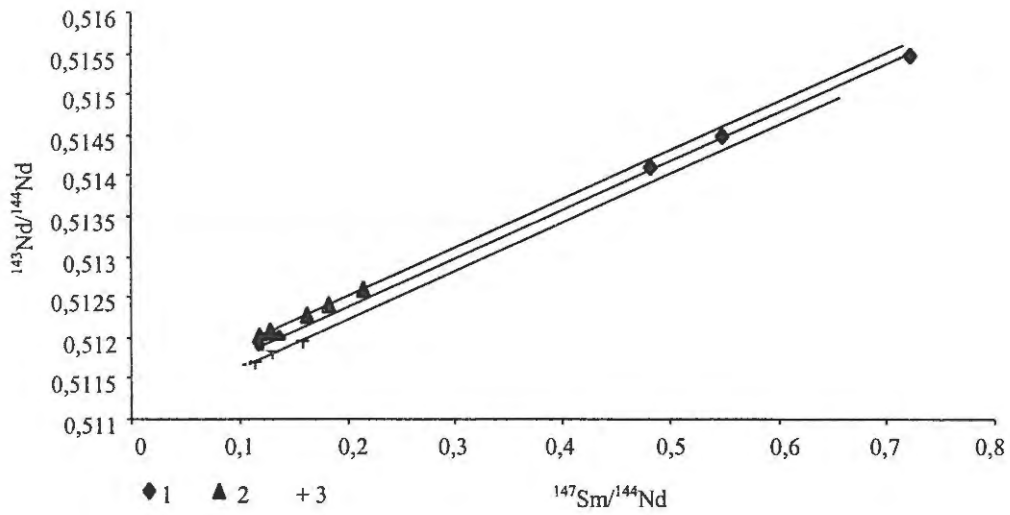


Рис.1. Самарий-неодимовые изохроны для минералов разных стадий оруденения
1 – стадия II (вольфрамит, шеелит); 2 – стадия III (шеелит 2, цоизит);
3 – стадия VI (флюорит, карбонат)

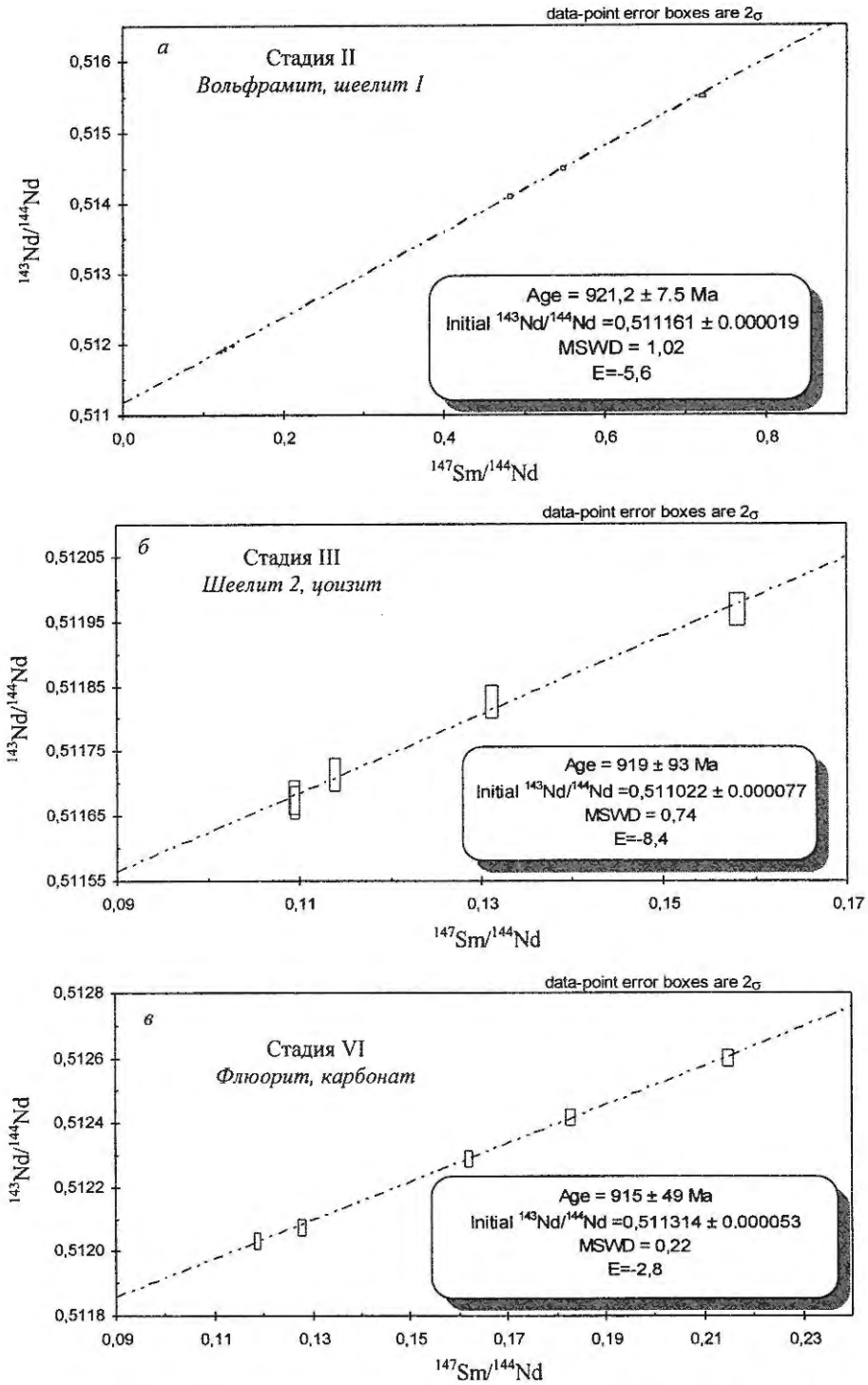


Рис.2. Самарий-неодимовые изохроны для минералов стадий II (*а*), III (*б*) и VI (*в*)

Соотнесение изохронных и модельных самарий-неодимовых датировок с историей геологического развития региона позволяет построить возможную схему формирования золотого оруденения Верхне-Енашиминского рудного узла.

В архейское время формируются первичные зеленокаменные пояса, представленные вулканогенно-осадочными породами малогаревской толщи, насыщенными вулканитами коматиит-базальтовой формации. После сводового поднятия территории

происходило интенсивное химическое выветривание, продукты которого переносились в области прогибов, где формировались мощные толщи отложений тейской серии и толеит-базальтовые вулканиты индыглинского комплекса. В раннем протерозое режим растяжения сменяется режимом сжатия, вследствие чего породы тейской серии были интенсивно метаморфизированы. На рубеже 1850 млн лет происходит образование гранитогнейсовых куполов гаревского мигматит-гранитового комплекса, сопровождающееся ультраметаморфизмом и гранитизацией.

Модельные датировки времени выхода Nd из мантии для дорудной редкометальной и пострудной минерализации соотносятся со временем формирования гранитогнейсовых куполов. Так, для золото-шеелит-сульфидной минерализации пребывание Nd в коре исчисляется 2250-2300 млн лет, что коррелирует со временем внедрения индыглинских толеит-базальтовых вулканитов. Как известно, именно с толеитовой магмой во многих регионах мира связывается поступление большого количества металлов, относящихся к группе центробежных элементов – золота, железа, никеля и платины.

В рифейское время, после заложения мощных рифтовых зон, на исследуемой территории существовал режим пассивной континентальной окраины, в условиях которой формировались мощные терригенные толщи сухопитской серии. В позднем рифее происходит столкновение западного края Сибирского континента с островной дугой энсиалического типа, что приводит к внедрению крупных гранитоидных батолитов татарско-аяхтинского комплекса, возраст которых 930-950 млн лет. На позднем этапе субдукционного процесса происходит подновление зон глубинных разломов, метаморфизм, складчатость, надвигообразование. На завершающей стадии субдукции вдоль зон глубинных разломов происходят процессы углеродистого метасоматоза, перенос и перераспределение металлов. С данным периодом исследования Sm-Nd позволяют соотнести возраст рудообразования (921-915 млн лет).

Проведенные исследования подтверждают современную модель формирования золоторудной минерализации в регионе. Первичный цикл золотооруденения связан с зеленокаменными поясами, где источником золота являлись толеитовые магмы, приводящие к образованию золото-кварцевых объектов; далее в результате размыва зон первичной золоторудной минерализации в метаосадочных породах возникали повышенные концентрации золота, которые под воздействием мощного термально-флюидного воздействия при внедрении гранитоидов татарско-аяхтинского комплекса ремобилизировались и переотлагались в структурных ловушках при последующем надвигообразовании, приводя к появлению промышленных концентраций металла.

Практические рекомендации сводятся к проявлению повышенного внимания со стороны геологических организаций, ведущих поисковые работы на золото в исследуемом регионе, к участкам выхода на поверхность зон зеленокаменных поясов с интрузиями основного состава, где возможно обнаружение новых золоторудных объектов кварцево-прожилкового типа.

Автор выражает благодарность Б.В.Беляцкому (ИГГД РАН) за помощь в проведении аналитических исследований и полезные консультации.

Работа поддержана грантами Министерства образования E02-9.0-164 и АФГИР (CRDF) ST-015-0.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Генкин А.Д.* Золотые руды месторождения Олимпиада (Енисейский кряж, Сибирь) / А.Д.Генкин, В.А.Лопатин, Р.А.Савельев, Ю.Г.Сафонов, Н.Б.Сергеев, А.Л.Керзин, А.И.Цепин, Х.Амшутц, З.Б.Афанасьева, Ф.Вагнер, Г.Ф.Иванова // Геол. рудн. мест. 1994. Т.3. № 2. С.111-136.

2. *Савичев А.А.* Золото-сульфидное оруденение Северо-Енисейского района (Сибирь) и условия его формирования / А.А.Савичев, В.В.Гавриленко // ЗВМО. 2003. № 2. С.15-33.

3. *Фор Г.* Основы изотопной геологии. М.: Мир. 1989. 590 с.

4. *Ludwig K.R.* Users Manual for Isoplot/Ex rev.2.49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center: Special Publication. No. 1a. 2001. P.56.

Научный руководитель д.г.-м.н. проф. *Ю.Б.Марин*