

УДК 553.411(470.21)

## ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД, ВМЕЩАЮЩИХ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ЗОЛОТА АРХЕЙСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА КОЛМОЗЕРО-ВОРОНЬЯ (КОЛЬСКИЙ РЕГИОН)

© 2015 г. Н. М. Кудряшов, А. А. Калинин, Л. М. Лялина, П. А. Серов, Д. В. Елизаров

*Геологический институт Кольского НЦ РАН  
184209, г. Апатиты, Мурманская обл., ул. Ферсмана, 14  
E-mail: nik@geoksc.apatity.ru*

Поступила в редакцию 14.11.2014 г.

Принята к печати 02.07.2015 г.

Проведено геохронологическое и изотопно-геохимическое исследование рудопроявлений золота Оленинское и Няльм-1 архейского зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья Кольского региона. Рудопроявления Оленинское и Няльм-1 относятся к орогеническому типу месторождений и связаны с комплексом малых интрузий габбро-диоритов–диоритов–гранодиорит-порфиринов и кварцевых порфиринов. U-Pb (по циркону) возраст внедрения интрузий комплекса определен равным  $2828 \pm 8$  млн лет для кварцевых порфиринов, вмещающих рудопроявление Оленинское, и  $2825 \pm 7$  млн лет для гранодиорит-порфиринов, вмещающих рудопроявление Няльм-1. Развитие золоторудной минерализации на обоих рудопроявлениях происходило в интервале между формированием малых интрузий комплекса габбро-диоритов–гранодиорит-порфиринов–гранит-порфиринов  $\approx 2.83$  млрд лет назад и внедрением турмалиновых гранитов и редкометалльных пегматитов, возраст которых составляет  $\approx 2.5$  млрд лет. Рудопроявления формировались в неархейское время в ходе гидротермально-метасоматического преобразования пород на регрессивной стадии регионального метаморфизма. Rb-Sr изохронный возраст  $2779 \pm 72$  млн лет, полученный для апатита и валовых проб гранодиорит-порфиринов рудопроявления Няльм-1, вероятно, отражает время указанных преобразований. Sm-Nd изотопные данные для кварцевых порфиринов и гранодиорит-порфиринов, вмещающих рудопроявления Оленинское и Няльм-1, свидетельствуют о выплавлении первичных расплавов из мантийного источника с  $\epsilon_{Nd} = +0.01 \dots +2.63$  без существенной добавки корового материала.

Ключевые слова: *рудопроявления золота, геохронология, изотопная геохимия, зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья, Фенноскандинавский щит, неархей.*

### ВВЕДЕНИЕ

Архейские зеленокаменные пояса содержат, по разным оценкам, от 12 до 25% коренного золота в мире (Дудкин, 2014; Groves, Phillips, 1987). Большинство подобных месторождений и проявлений относятся к мезотермальному орогеническому типу, которые, как правило, размещаются в аккрецированных террейнах и контролируются глубинными зонами сдвиговых дислокаций (deep shear zones) (Kerrich, Wyman, 1990; Groves et al., 1998, 2003). Крупнейшие месторождения этого типа известны в пределах Канадского (Керкленд Лейк), Западно-Индийского (Колар) и Западно-Австралийского (Калгурли) кратонов (Kerrich et al., 2000).

На Фенноскандинавском щите до последнего времени месторождения золота в зеленокаменных поясах (ЗКП) не играли значимой роли, поскольку основные ресурсы были связаны с месторождениями колчеданного типа в свекофенских комплек-

сах Швеции и Финляндии. Благодаря целенаправленным поисковым работам, проведенным в Финляндии в конце XX и начале XXI вв., ситуация изменилась. В центральной части щита были обнаружены месторождения золота, связанных как с неархейскими, так и с палеопротерозойскими зеленокаменными структурами. Наиболее крупным является палеопротерозойское золоторудное месторождение мирового класса Суурикуусикко в северной Финляндии с запасами свыше 150 т золота (Gold..., 2007; FINGOLD..., 2009). В архейских ЗКП Фенноскандинавского щита известны разрабатываемые месторождения Пампало и Валкеасуо, размещенные в ЗКП Иломанси в восточной Финляндии (Geological..., 1993; FINGOLD..., 2009). К разряду перспективных на золото архейских структур на территории России относятся рудопроявления в Костамукшском и Авнеозеро-Парандовском поясах Карельской провинции и рудопроявления Оленинское и Няльм-1 в (ЗКП) Колмозеро-Воронья

Кольской провинции, а на территории восточной Финляндии – рудопоявления в поясах Кухмо и Суомусалми (Ивашенко, Голубев, 2011; Новоселов и др., 2014).

Определение времени формирования коренных месторождений золота в докембрийских структурах является достаточно сложной задачей вследствие неоднократных проявлений процессов метаморфизма и метасоматоза, приводящих к перераспределению рудного вещества и нарушениям изотопно-геохимических систем. В связи с этим существуют разные точки зрения на возраст золоторудной минерализации в архейских ЗКП Карельской и Кольской провинций, основанные как на геолого-минералогических, так и на изотопно-геохронологических исследованиях. Согласно одной из них, генезис рудопоявлений связан с накоплением стратиформных вулканогенных толщ, обогащенных сульфидами и золотом, с последующим их метаморфизмом и воздействием поздних неархейских гранитоидов (Кулешевич, Фурман, 2009; Ивашенко, Голубев, 2011). Другая точка зрения ведущую роль в рудогенезе отводит тектоническим и гидротермально-метасоматическим процессам, проявившимся в архейских структурах в позднем палеопротерозое  $\approx 1.7$  млрд лет назад (Ларинова и др., 2004, 2013; Самсонов и др., 2011; Вревский, 2012).

В предлагаемой статье приведены результаты изотопно-геохронологических исследований по определению времени формирования пород, вмещающих рудопоявления Оленинское и Няльм-1, которые расположены в северо-западной части архейского ЗКП Колмозеро-Воронья, а также дана их геохимическая и изотопная характеристика.

#### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И МЕТАМОРФИЗМА ПОРОД ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА КОЛМОЗЕРО-ВОРОНЬЯ

Неархейский ЗКП Колмозеро-Воронья представляет собой линейную структуру общей протяженностью не менее 250 км при ширине до 12 км, которая отделяет Мурманский домен от Кольско-Норвежского домена (рис. 1, врезка). Эта структура интерпретируется как синклиналь с хорошо сохранившимся юго-западным крылом и сложно построенным тектонически нарушенным и насыненным интрузивными образованиями северо-восточным крылом (Белолипецкий и др., 1980; Вревский, 1989) или как сутурная зона чешуйчатонадвигового строения, в которой породы в целом залегают моноклинально и несут признаки океанического и островодужного магматизма (Никитин, 1980; Минц и др., 1996; Гавриленко и др., 2002). Геохронологические данные свидетельствуют о не-

архейском возрасте процессов вулканизма и осадконакопления, интрузивного магматизма, а также процессов метаморфизма (Пушкарев и др., 1978; Кудряшов и др., 2013; Kudryashov et al., 2001).

Супракурстальные породы ЗКП Колмозеро-Воронья представлены метавулканитами коматиит-толеитовой и базальт-андезит-дацитовых серий, а также метапелитами и метапесчаниками, относимыми к колмозерской серии среднего лопья и поросозерской серии верхнего лопья. Детально состав и строение этих супракурстальных толщ рассматривается в (Прияткина, Дагелайский, 1965; Белолипецкий и др., 1980; Вревский, 1989; и др.).

Интрузивные образования в северо-западной части ЗКП Колмозеро-Воронья представлены:

- массивами перидотитов, пироксенитов и габбро, комагматичными вулканитам коматиит-толеитовой серии;
- гранит-порфирами и комплексом малых интрузий габбро-диоритов–диоритов–гранодиорит-порфинов, дайками кварцевых порфинов;
- позднекинематическими интрузиями плагио-микроклиновых и турмалиновых гранитов с жилами турмалиновых и редкометалльных пегматитов;
- несколькими генерациями диабазовых даек предположительно палеопротерозойского и палеозойского возраста.

Малые интрузии комплекса габбро-диоритов–диоритов–гранодиорит-порфинов, с которыми связаны золоторудные проявления Оленинское и Няльм-1, представлены дайками и незначительными по размерам (до  $0.2 \times 3$  км) штокообразными телами удлиненно-овальной формы с крутым ( $70-90^\circ$ ) падением контактов (рис. 1, 2). Они сконцентрированы в осевой части ЗКП Колмозеро-Воронья, прорывают все его стратифицированные образования и секутся турмалиновыми и микроклиновыми гранитами, а также пегматитовыми жилами. Химический состав пород, вмещающих рудопоявления, приведен в табл. 1. Более детально геологическое строение рудопоявлений рассмотрено в (Калинин, 1991; Галкин, 2006; Калинин и др., 2010).

В развитии регионального метаморфизма ЗКП Колмозеро-Воронья выделяются два этапа (Прияткина, Дагелайский, 1965; Беляев и др., 1977; Беляев, Петров, 2002; Бельков и др., 1982). Метаморфизм раннего этапа протекал в условиях низкотемпературной субфации амфиболитовой фации пониженного давления андалузит-силлиманитовой фациальной серии при средних значениях температуры и давления примерно  $600^\circ\text{C}$  и 3–4 кбар (Другова и др., 1982). Эти метаморфические преобразования изофациальны и близки процессам метаморфизма и гранитизации в Мурманском домене, что, возможно, свидетельствует о коллизионной природе метаморфизма (Минц и др., 1996). Возраст регионального метаморфизма раннего этапа оценивается в 2.77–2.68 млрд лет (Беляев, Петров, 2002).

**Рис. 1.** Схема геологического строения участка рудопроявления Оленинское.

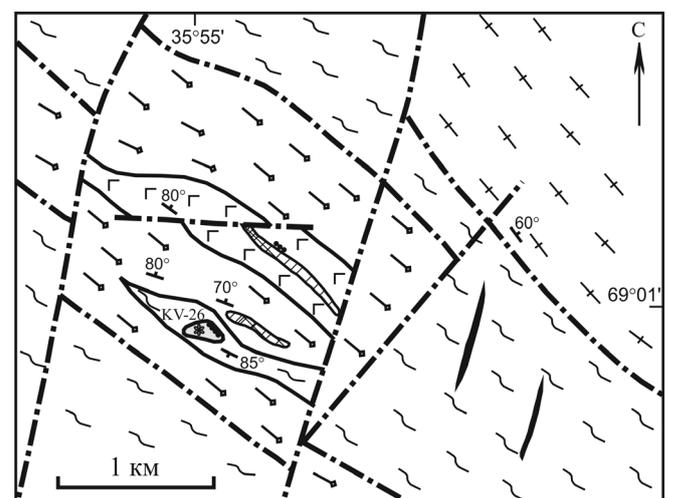
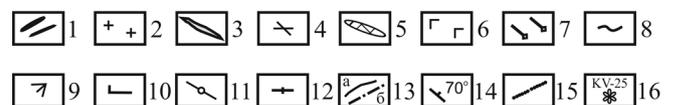
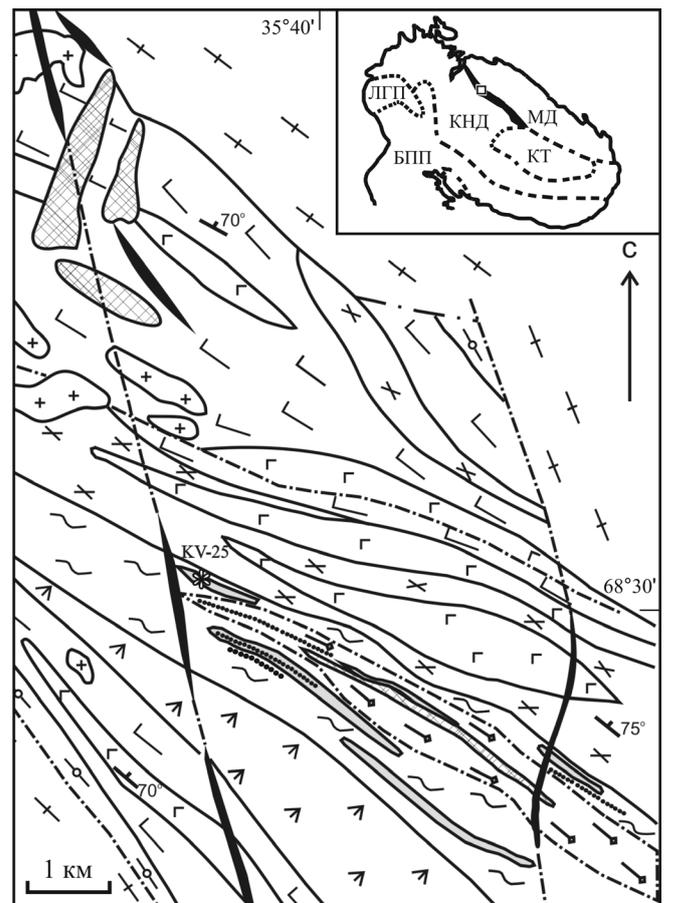
1 – дайки диабазов и диабазовых порфиров; 2 – турмалиновые и плагиомикроклиновые граниты; 3 – комплекс малых интрузий габбро-диоритов-диоритов-гранодиорит-порфиров; 4 – гранит-порфиры, кварц-мусковитовые и мусковит-андалузитовые метасоматиты по ним; 5 – метапироксениты и метаперидотиты; 6 – метагаббро; 7 – амфиболиты хр. Оленьего (оленинская толща); 8 – метасадочные породы поросозерской серии: андалузит-биотитовые, ставролит-биотитовые, кордиеритовые сланцы, плагиогнейсы (метапелиты, метаграувакки) и углеродистые сланцы; 9 – метавулканыты вороньетундровской свиты: биотит-полевошпатовые гнейсы, лептиты; 10 – метавулканыты полмостундровской свиты: амфиболиты; 11 – метасадочные породы лязозерской свиты: гранат-биотитовые сланцы; 12 – гнейсоплагиограниты; 13 – геологические границы (а), тектонические нарушения (б); 14 – элементы залегания; 15 – минерализованные зоны рудопроявлений; 16 – места отбора геохронологических проб. На *врезке* контур Кольского полуострова с выделенными крупными тектоническими блоками (штриховая линия): МД – Мурманский домен; КНД – Кольско-Норвежский домен; КТ – Кейвский террейн; ЛПП – Лапландский гранулитовый пояс; БПП – Беломорский подвижный пояс. Жирным показан зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья с районом исследования (белый квадрат).

**Fig. 1.** Sketch geological map of the Oleninskoe ore occurrence.

1 – diabase and diabase porphyry dykes; 2 – tourmaline and plagiomicrocline granite; 3 – complex of minor gabbrodiorite – diorite-granodiorite porphyry intrusions; 4 – granite porphyry, muscovite-quartz and andalusite-muscovite metasomatites; 5 – metapyroxenite and metaperidotite; 6 – metabasalt; 7 – amphibolite of the Oleniy Ridge; 8 – metasedimentary rocks of the Porosozero series – biotite-andalusite, biotite-stavrolite, cordierite schists and gneisses, carbonaceous schist; 9 – metavolcanites of the Voronyetundrovskaya formation – feldspar-biotite gneiss, leptytes; 10 – mafic metavolcanites of the Polmostundrovskaya unit – amphibolites; 11 – metasedimentary rocks of the Lyavozero series – biotite-garnet schists; 12 – gneiss-plagiogranites; 13 – geological boundaries (a), faults (b); 14 – bedding of rocks; 15 – ore occurrences; 16 – sites of geochronological samples.

The insert: Kola Peninsula contour with the main tectonic blocks (dashed lines): МД – Murmansk domain; КНД – Kola-Norwegian domain; КТ – Keivy terrain; ЛПП – Lapland granulite belt; БПП – Belomorian belt. Bold line – the Kolmozero-Voronya greenstone belt with the area of investigations (white quadrangle).

На регрессивной стадии раннего этапа метаморфизма интенсивное развитие получили процессы кислотного выщелачивания и сопряженного с ним железо-магнезиально-кальциевого метасоматоза. Минеральные ассоциации метасоматитов указывают на значения температуры и давления, близкие к пику метаморфизма на этом этапе (в среднем 550°C и 3.3 кбар) (Другова и др., 1982). Метаморфические процессы регрессивной стадии завершались внедрением позднекинематических



**Рис. 2.** Схема геологического строения участков рудопроявлений Няльм-1 и Няльм-2.

Условные обозначения – см. рис. 1.

**Fig. 2.** Sketch geological map of Nyalm-1 and Nyalm-2 ore occurrences.

Legend – see Fig. 1.

**Таблица 1.** Содержание петрогенных, редких и редкоземельных элементов в породах, вмещающих рудопроявления Оленинское и Няльм-1

**Table 1.** Petrogenic, rare and rare earth elements in host rocks in the Oleninskoe and Nyalm-1 ore occurrences

Компонент	Рудопроявление Оленинское											
	КВ-25*	КВ-25/1*	ВП-10	ВП-24	ВП-23	ВП-42*	ВП-43*	АК-25*	АК-13*	АК-40	АК-45	АК-52
SiO <sub>2</sub>	69.91	68.59	69.53	69.02	61.11	51.48	69.44	69.08	49.74	74.85	73.00	70.51
TiO <sub>2</sub>	0.52	0.23	0.23	1.15	1.20	0.69	0.25	0.74	1.28	0.27	0.38	0.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.01	14.72	16.20	9.38	11.83	8.51	14.38	13.78	12.58	13.78	13.11	16.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71	0.75	0.48	4.77	7.36	2.47	0.49	2.24	3.42	0.10	0.37	0.74
FeO	1.68	2.28	1.36	3.06	1.78	8.74	3.06	2.60	12.15	4.33	3.90	3.17
MnO	0.03	0.05	0.03	0.02	0.01	0.22	0.17	0.02	0.25	0.06	0.11	0.06
MgO	0.76	0.90	1.18	0.38	0.19	10.14	2.18	0.17	5.50	0.41	1.14	0.72
CaO	2.88	3.46	1.74	0.61	0.41	14.60	3.48	0.28	10.31	0.86	2.30	1.93
Na <sub>2</sub> O	4.57	4.95	6.28	2.76	3.18	0.26	0.96	2.78	2.17	0.39	1.44	1.34
K <sub>2</sub> O	2.22	1.55	1.56	0.79	1.98	0.10	1.71	2.32	0.37	2.06	1.50	1.85
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.06	0.06	0.22	0.17	0.06	0.10	0.10	0.11	0.07	0.08	0.11
S общ.	0.03	0.08	0.01	2.24	3.04	0.06	0.62	0.06	0.11	0.11	0.50	0.42
П.п.п.	1.05	1.01	0.21	2.96	1.15	2.43	2.01	3.27	1.82	0.00	0.00	0.00
Сумма	99.44	98.63	98.87	97.36	93.41	99.76	98.85	97.44	99.81	97.29	97.83	97.78
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	6.79	6.50	7.84	3.55	5.16	0.36	2.67	5.10	2.54	2.45	2.94	3.19
Li	8.48	45.97	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.51	15.98	43.47	100.46	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Be	1.08	1.38	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.22	0.67	0.31	0.26	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Sc	4.30	3.13	Н.о.	Н.о.	Н.о.	41.99	2.42	24.80	46.90	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Ti	1450.45	1597.24	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3697.91	1206.01	3122.83	6592.80	Н.о.	Н.о.	Н.о.
V	31.43	28.15	Н.о.	Н.о.	Н.о.	205.24	21.99	197.51	346.67	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Cr	12.00	300.24	Н.о.	Н.о.	Н.о.	412.65	399.63	862.26	126.94	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Mn	220.54	454.26	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2239.77	1698.23	160.40	2620.33	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Co	4.16	2.98	Н.о.	Н.о.	Н.о.	55.27	4.50	2.66	48.81	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Ni	8.33	17.46	Н.о.	Н.о.	Н.о.	158.99	17.52	12.85	44.97	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Cu	13.03	20.61	Н.о.	Н.о.	Н.о.	33.36	19.11	77.82	62.02	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Zn	43.73	35.07	Н.о.	Н.о.	Н.о.	55.97	110.46	24.84	77.44	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Ga	22.42	23.45	Н.о.	Н.о.	Н.о.	10.88	19.20	14.88	17.32	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Ge	0.74	1.14	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.93	1.40	2.33	2.23	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Rb	51.58	41.93	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2.87	56.43	50.33	6.27	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Sr	486.95	415.82	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1116.41	117.36	62.49	138.60	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Y	11.58	9.79	Н.о.	Н.о.	Н.о.	13.07	13.84	9.80	28.43	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Zr	100.82	113.31	Н.о.	Н.о.	Н.о.	20.66	127.22	56.73	44.20	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Nb	5.48	4.22	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.99	6.64	1.47	2.98	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Mo	0.69	1.11	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.26	2.30	1.20	0.86	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Ag	0.16	0.34	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.15	0.49	25.67	1.42	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Cd	0.16	0.29	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.14	0.45	0.29	0.09	Н.о.	Н.о.	Н.о.



Таблица 1. Продолжение  
Table 1. Continuation

Компонент	ВП-227*	ВП-228*	ВП-230	ВП-231	АК-237	АК-248	КВ-26*	ВП-221	ВП-222	ВП-223*	ВП-224*	ВП-226	ВП-225
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CaO	1.83	2.00	3.16	1.99	2.79	1.87	2.08	4.46	4.79	4.49	3.67	6.41	2.81
Na <sub>2</sub> O	5.49	4.47	3.26	4.88	3.88	5.69	4.80	1.46	3.03	1.19	2.43	0.88	2.19
K <sub>2</sub> O	1.53	1.71	2.52	1.25	2.41	1.47	1.90	2.34	1.11	1.54	2.27	1.75	2.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.05	0.06	0.04	0.09	0.07	0.08	0.07	0.08	0.05	0.09	0.09	0.09
S общ.	0.10	0.07	0.05	0.03	0.34	0.05	0.07	0.28	0.26	0.40	0.30	0.38	0.36
П.п.п	1.31	1.16	1.21	0.72	1.19	0.67	0.48	1.68	0.81	2.27	1.65	1.50	1.10
Сумма	99.99	99.05	98.9	99.42	99.22	99.54	99.78	99.79	99.05	99.6	99.7	99.36	98.88
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	7.02	6.18	5.78	6.13	6.29	7.16	6.70	3.80	4.14	2.73	4.70	2.63	4.29
Li	20.14	21.39	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	11.33	Н.о.	Н.о.	14.14	40.18	Н.о.	Н.о.
Be	1.35	1.07	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.39	Н.о.	Н.о.	0.86	0.74	Н.о.	Н.о.
Sc	3.45	5.77	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3.43	Н.о.	Н.о.	3.98	28.07	Н.о.	Н.о.
Ti	1817.94	1810.78	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1543.70	Н.о.	Н.о.	1680.82	7059.54	Н.о.	Н.о.
V	34.08	42.72	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	27.41	Н.о.	Н.о.	28.88	229.61	Н.о.	Н.о.
Cr	31.93	307.88	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	310.03	Н.о.	Н.о.	278.84	231.89	Н.о.	Н.о.
Mn	301.45	335.68	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	283.70	Н.о.	Н.о.	392.19	621.71	Н.о.	Н.о.
Co	9.36	8.96	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	4.78	Н.о.	Н.о.	9.47	42.95	Н.о.	Н.о.
Ni	38.28	26.67	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	25.78	Н.о.	Н.о.	26.61	96.84	Н.о.	Н.о.
Cu	15.21	21.37	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	27.09	Н.о.	Н.о.	33.00	91.53	Н.о.	Н.о.
Zn	41.35	37.60	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	42.73	Н.о.	Н.о.	35.72	73.78	Н.о.	Н.о.
Ga	20.80	18.37	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	21.79	Н.о.	Н.о.	15.92	18.33	Н.о.	Н.о.
Ge	0.83	0.85	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.91	Н.о.	Н.о.	1.24	1.42	Н.о.	Н.о.
Rb	36.30	29.59	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	32.11	Н.о.	Н.о.	42.39	56.33	Н.о.	Н.о.
Sr	516.27	600.14	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	322.90	Н.о.	Н.о.	178.89	185.75	Н.о.	Н.о.
Y	3.39	4.36	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	6.30	Н.о.	Н.о.	4.91	15.02	Н.о.	Н.о.
Zr	97.65	77.30	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	120.70	Н.о.	Н.о.	95.06	125.00	Н.о.	Н.о.
Nb	4.52	3.34	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	5.09	Н.о.	Н.о.	3.62	6.32	Н.о.	Н.о.
Mo	1.21	0.80	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2.45	Н.о.	Н.о.	1.67	1.62	Н.о.	Н.о.
Ag	0.23	0.17	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.28	Н.о.	Н.о.	0.24	0.35	Н.о.	Н.о.
Cd	0.17	0.18	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.19	Н.о.	Н.о.	0.23	0.25	Н.о.	Н.о.
Sn	1.32	0.84	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.57	Н.о.	Н.о.	1.06	1.49	Н.о.	Н.о.
Sb	0.50	0.90	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.28	Н.о.	Н.о.	0.33	0.45	Н.о.	Н.о.
Te	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.05	Н.о.	Н.о.	0.07	0.06	Н.о.	Н.о.
Cs	3.64	4.99	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3.55	Н.о.	Н.о.	5.67	2.51	Н.о.	Н.о.
Ba	527.16	528.86	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	941.30	Н.о.	Н.о.	225.79	322.17	Н.о.	Н.о.
La	9.14	15.25	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	7.89	Н.о.	Н.о.	15.82	9.01	Н.о.	Н.о.
Ce	41.29	30.41	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	25.86	Н.о.	Н.о.	29.63	20.75	Н.о.	Н.о.
Pr	2.35	3.17	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2.49	Н.о.	Н.о.	3.15	2.63	Н.о.	Н.о.

Таблица 1. Окончание  
Table 1. Ending

Компонент	ВП-227*	ВП-228*	ВП-230	ВП-231	АК-237	АК-248	KV-26*	ВП-221	ВП-222	ВП-223*	ВП-224*	ВП-226	ВП-225
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Nd	8.20	10.66	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	9.31	Н.о.	Н.о.	10.91	10.33	Н.о.	Н.о.
Sm	1.45	1.57	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.89	Н.о.	Н.о.	1.74	2.51	Н.о.	Н.о.
Eu	0.54	0.54	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.69	Н.о.	Н.о.	0.66	0.77	Н.о.	Н.о.
Gd	1.86	2.18	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	2.25	Н.о.	Н.о.	2.28	2.99	Н.о.	Н.о.
Tb	0.15	0.16	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.23	Н.о.	Н.о.	0.20	0.42	Н.о.	Н.о.
Dy	0.76	0.88	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.29	Н.о.	Н.о.	1.02	2.89	Н.о.	Н.о.
Ho	0.14	0.17	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.26	Н.о.	Н.о.	0.19	0.63	Н.о.	Н.о.
Er	0.40	0.44	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.75	Н.о.	Н.о.	0.54	1.97	Н.о.	Н.о.
Tm	0.06	0.07	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.11	Н.о.	Н.о.	0.07	0.32	Н.о.	Н.о.
Yb	0.37	0.41	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.76	Н.о.	Н.о.	0.51	2.10	Н.о.	Н.о.
Lu	0.06	0.06	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.12	Н.о.	Н.о.	0.07	0.31	Н.о.	Н.о.
Hf	2.82	2.04	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3.62	Н.о.	Н.о.	2.51	3.43	Н.о.	Н.о.
Ta	0.41	0.31	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.40	Н.о.	Н.о.	0.32	0.47	Н.о.	Н.о.
W	1.15	0.97	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.82	Н.о.	Н.о.	0.97	0.81	Н.о.	Н.о.
Tl	0.19	0.20	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.24	Н.о.	Н.о.	0.56	0.28	Н.о.	Н.о.
Pb	9.92	8.17	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	12.44	Н.о.	Н.о.	8.89	5.97	Н.о.	Н.о.
Bi	0.50	0.12	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.07	Н.о.	Н.о.	0.10	0.27	Н.о.	Н.о.
Th	4.09	3.03	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	3.35	Н.о.	Н.о.	3.48	3.60	Н.о.	Н.о.
U	1.61	0.89	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.27	Н.о.	Н.о.	1.09	1.20	Н.о.	Н.о.

Примечание. 1, 2, 7 – кварцевый порфир; 3 – гранит-порфир; 4, 5, 8, 11 – кварц-мусковитовый метасоматит; 6 – метатеридотит; 9 – метасоматизированный амфиболит; 10, 12 – мусковит-андалузитовый метасоматит; 13–22 – гранодиорит-порфир; 23–25 – диорит-порфир.

\*Редкоземельные элементы определены методом ICP-MS в аналитической лаборатории Института геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург. Погрешность определения элементов <2%. Н.о. – элемент не определяется.

Note: 1, 2, 7 – quartz porphyry, 3 – granite porphyry, 4, 5, 8, 11 – muscovite-quartz metasomatic rock, 6 – metaperidotite, 9 – altered amphibolite, 10, 12 – andalusite-muscovite metasomate, 13–22 – granodiorite porphyry, 23–25 – diorite porphyry.

\*Rare earth elements were assayed with ICP-MS method in the Analytical Laboratory of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Ekaterinburg. Accuracy of assaying <2%. Н.о. – not analyzed.

плаггиомиоклиновых и турмалиновых гранитов, с которыми связаны пегматитовые жилы турмалиновых и редкометалльных пегматитов (Другова и др., 1982; Белолипецкий и др., 1987), причем последние прорывают метасоматиты, связанные с поздними деформациями этой стадии (Глебовицкий, Бушмин, 1983). Pb-Pb изохронный возраст турмалина из турмалиновых гранитов составил  $2520 \pm 70$  млн лет (Кудряшов и др., 1999). Возраст редкометалльных пегматитов, установленный **U-Pb датированием** микролита из пегматитов месторождения Васин-Мыльк, равен  $2454 \pm 8$  млн лет (Кудряшов и др., 2015).

Поздний этап метаморфизма относится к кианит-силлиманитовой фациальной серии и характеризуется пониженными значениями температуры и повышенными – давления (в среднем  $530^\circ\text{C}$  и 5.5 кбар (Другова и др., 1982)). В рассматриваемом северо-западном фрагменте пояса он лишь частично уничтожил ассоциации раннего этапа метаморфизма. В породах, претерпевших метаморфизм кианит-силлиманитового типа, выявлены следующие изменения: развитие параморфоз кианита по андалузиту, частичная перекристаллизация слюд, изменение состава во внешних каймах порфиروبласт граната и замещение кордиерита мелкозернистым агрегатом ставролита и хлорита (Другова и др., 1982; Петров и др., 1984).

Время позднего этапа метаморфизма оценивается преимущественно по **K-Ag датировкам мусковита** в 1.9–1.8 млрд лет (Морозова и др., 1979).

#### МЕТОДИКИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выделение циркона из крупных проб весом более 50 кг проводилось по стандартной методике с использованием магнитной сепарации и тяжелых жидкостей. **U-Pb изотопные исследования** выполнены для навесок зерен циркона разных размеров фракций. Внутреннее строение индивидуальных зерен циркона изучалось с помощью оптического микроскопа и катодолюминесценции. Разложение и химическое выделение Pb и U проводилось по методике Т. Кроу (Krogh, 1973). Уровень холостого опыта за период исследования не превышал 80 пг для Pb и 40 пг для U. Координаты точек и параметры изохрон рассчитывались по программам “PbDAT” (Ludwig, 1991) и “ISOPLOT” (Ludwig, 1999).

Определения изотопного состава Pb и U выполнены на масс-спектрометрах МИ-1201-Т и Finnigan MAT-262 (RPQ) в статическом режиме или с помощью электронного умножителя. Все изотопные отношения исправлены на масс-фракционирование, полученное при изучении параллельных анализов стандартов SRM-981 и SRM-982,  $0.18 \pm 0.06\%$  для МИ-1201-Т и  $0.12 \pm 0.04\%$  для Finnigan

MAT-262 (RPQ). Аналитические погрешности **U-Pb отношений составляли 0.5–0.7%**. Обработке экспериментальных данных проводили по программам “PbDAT” (Ludwig, 1991) и “ISOPLOT” (Ludwig, 1999). **Поправки на обычный свинец** введены в соответствии с модельными величинами (Stacey, Kramers, 1975). Все ошибки приведены на уровне  $2\sigma$ .

Исследования циркона в режиме катодолюминесценции проведены на растровом электронном микроскопе “LEO1450”, оснащенный катодолюминесцентной приставкой “PANA CL”. Рабочее расстояние 13 мм, величина силы тока зонда 75–300 нА, ускоряющее напряжение 20 кВ. Визуализация осуществлялась с помощью фотоумножителя “GATAN” с диапазоном области спектра 400–700 нм. Окончательное катодолюминесцентное изображение циркона фиксировалось в цифровом виде.

Измерения изотопного состава Nd и концентраций Sm и Nd проводили на семиканальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 (RPQ) в статическом двухленточном режиме на коллекторах с использованием ренийевых и танталовых лент. Измерения изотопного состава Nd в стандарте La Jolla составили  $0.511833 \pm 0.000006$  и не превышают  $0.0024\%$  ( $2\sigma$ ). Подобные значения были получены при измерении 100 параллельных анализов японского стандарта JNd<sub>1</sub> =  $0.512068 \pm 0.000010$ . Погрешность в  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  отношениях составляет  $0.2\%$  ( $2\sigma$ ) – среднее значение из семи измерений в стандарте BCR. Холостое внутрилабораторное загрязнение по Nd равно 0.3 нг и по Sm – 0.06 нг. Все измеренные изотопные отношения Nd были нормализованы по отношению  $^{148}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.241570$ , а затем пересчитаны на отношение  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512068$  в стандарте JNd<sub>1</sub>. Расчеты параметров изохрон проводили использованием программ К. Людвиг (Ludwig, 1991, 1999).

Изотопный состав Sr и определение содержания Rb и Sr проводили на масс-спектрометре МИ-1201-Т в двухленточном режиме на ренийевых и танталовых лентах. На ленты наносили подготовленные пробы в нитратной форме. Изотопный состав Sr во всех измеренных образцах был нормализован по величине, рекомендованной NBS в Международном стандарте SRM-987 (0.710235). Погрешности измерения изотопного состава Sr не превышают  $0.04\%$  ( $2\sigma$ ), а Rb-Sr отношений –  $1.5\%$  ( $2\sigma$ ). Холостое внутрилабораторное загрязнение по Rb составляет 2.5 нг, по Sr – 1.2 нг.

При расчете всех **U-Pb, Sm-Nd и Rb-Sr изотопных данных** использованы принятые величины констант распада (Steiger, Jäger, 1977).

Подробное описание методик изотопных исследований, применяемых в ГИ КНЦ РАН, дано Т.Б. Баяновой (2004).

## РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНА

Рудопроявления золота Оленинское, Няльм-1 и Няльм-2 располагаются в осевой части хр. Оленьего, при этом рудопроявление Оленинское приурочено к северо-западному окончанию хребта, а рудопроявления Няльм-1 и Няльм-2 – к юго-восточному (см. рис. 1, 2). Для изотопно-геохронологических исследований U-Pb методом по циркону были отобраны пробы из кварцевых порфиров рудопроявления Оленинское и гранодиорит-порфиров рудопроявления Няльм-1. Аналитические результаты исследований даны в табл. 2.

Проба кварцевых порфиров была взята из небольшого дайкового тела, расположенного в северо-западной части Оленинского рудопроявления. Кварцевые порфиры обнажаются среди гранат-биотит-кианит-ставролитовых плагиосланцев и амфиболитов и имеют с ними секущие контакты (см. рис. 1). Кварцевые порфиры слабо затронуты метасоматическими процессами, их текстура массивная, а структура порфировая. Кварц и плагиоклаз образуют порфировые вкрапленники размером до 0.5 см. Минеральный состав (об. %): кварц – до 50, серицитизированный олигоклаз – 15–30, биотит – 10, мусковит – до 15. Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом и пиритом. Вторичные минералы – карбонат и хлорит.

Циркон в пробе кварцевых порфиров включает два главных морфологических типа с переходными разностями между ними (рис. 3, I): первый – длиннопризматический (см. рис. 3, Ia, в) и второй – остродипирамидальный (см. рис. 3, Ib, г). Длиннопризматические зерна составляют около 60% всей популяции, остродипирамидальные – 30%. Размеры кристаллов от 50 до 250 мкм, коэффициент удлинения (Ку) равен 3.0–4.0. Кристаллы 1-го типа образованы преобладающими гранями призм {100} и {110}, а также дипирамидами {111} и {311}. В кристаллах 2-го типа преобладающими являются грани дипирамид {311} и {111}; также присутствуют грани призм {100} и {110}. В катодолюминесцентных лучах в цирконе обоих типов отчетливо проявлена тонкая осцилляционная зональность, свидетельствующая о кристаллизации минерала из расплава. Дискордия для восьми фракций циркона обоих типов определяет возраст  $2828 \pm 8$  млн лет, СКВО = 0.86 (рис. 4а). Нижнее пересечение дискордии с конкордией отражает современные потери свинца.

Проба гранодиорит-порфиров рудопроявления Няльм-1 была взята из наиболее кислой части интрузивного тела, прорывающего высокоуглеродистые сланцы (см. рис. 2). Текстура гранодиорит-порфиров массивная, структура порфировая. Основная масса сложена плагиоклазом, кварцем, биотитом, мусковитом; порфировые вкрапленники размером до 3 мм представлены кварцем и олигокла-

зом. Минеральный состав (об. %): плагиоклаз – 40–45, кварц – 30–35, биотит – 10, мусковит – 10, акцессорные минералы представлены эпидотом, цирконом, апатитом, пирротинном, пиритом и арсенопиритом.

Циркон в количестве около 50 мг был выделен из пробы весом около 30 кг и представлен двумя морфологическими типами: первый – призматическими кристаллами ( $\approx 80\%$  всех выделенных зерен) (см. рис. 3, Па, в), а второй – изометричными ( $\approx 20\%$ ) (см. рис. 3, Пб, г). Кристаллы первого типа полупрозрачные, трещиноватые, коричневатого цвета, удлиненные с преобладающими гранями призм {100} и {110} и дипирамидами {111} и {311}. Ребра сглажены, поверхности граней неровные, Ку = 3.0–4.0. Изометричные кристаллы второго типа прозрачные, розоватого цвета. В огранке призма {100} несколько преобладает над призмой {110}, дипирамиды {111} и {311} развиты практически одинаково. В катодолюминесценции наблюдается тонкая зональность роста.

Для изотопного датирования сначала были взяты 4 навески циркона 1-го типа, затем были проанализированы 2 навески циркона 2-го типа. Возраст для четырех фракций циркона 1-го типа составил  $2827 \pm 4$  млн лет, а для двух фракций циркона 2-го типа –  $2822 \pm 3$  млн лет, при этом фракция KV-26/5 является конкордантной (см. рис. 4б). Фигуративные точки циркона обоих типов лежат практически на одной линии и имеют в пределах погрешности один и тот же возраст. Очевидно, что в данном случае образование морфологически разных типов циркона было связано с изменением условий в кристаллизующемся расплаве. Об этом также свидетельствуют близкие значения содержания U и отношения Th/U в цирконе разных типов. Все это дало основание построить дискордию по всем 6 фракциям, возраст которой по верхнему пересечению с конкордией составил  $2825 \pm 7$  млн лет, СКВО = 2.8 (см. рис. 4б). Нижнее пересечение отражает современные потери свинца.

Полученные значения возраста для кварцевых гранодиорит-порфиров рудопроявления золота Няльм-1, равное  $2827 \pm 4$  млн лет, и кварцевых порфиров рудопроявления Оленинское –  $2828 \pm 8$  млн лет совпадают в пределах ошибок и интерпретируются нами как время кристаллизации пород. Таким образом, интрузии кварцевых порфиров рудопроявления Оленинское и интрузии гранодиорит-порфиров рудопроявления Няльм-1 относятся к единому комплексу малых интрузий неоархейских габбро-диоритов–диоритов–диоритовых порфиритов. Внедрение малых интрузий этого комплекса связано с завершающей стадией формирования супракрупных толщ ЗКП Колмозеро-Воронья, предшествовавшей региональному неоархейскому метаморфизму.

**Таблица 2.** Результаты U-Pb изотопного исследования циркона из вмещающих пород рудопроявлений Оленинское и Няльм-1  
**Table 2.** Results of U-Pb isotopic assaying of zircon from host rocks of the Oleninskoe and Nyalm-1 ore occurrences

Номер обр/ фракции	Навеска, мг	Содержание, мкг/г		Изотопные отношения					Rho			Возраст, млн лет	
		Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^*$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
Кварцевые порфиры рудопроявления Оленинское													
KV-25/1	0.65	244	340	285	0.2415±2	0.2463±2	0.5336±11	14.769±59	0.74	2757±6	2801±11	2832±4	
KV-25/2	0.50	111	162	400	0.2288±14	0.2222±11	0.5292±18	14.582±11	0.46	2738±10	2788±22	2825±12	
KV-25/3	0.35	162	203	142	0.2832±3	0.3786±7	0.5048±15	13.961±70	0.79	2635±8	2747±14	2831±5	
KV-25/4	0.25	71	121	480	0.2240±7	0.2445±10	0.4520±23	12.462±87	0.80	2404±12	2640±18	2826±7	
KV-25/5	0.20	163	267	530	0.2213±2	0.2105±2	0.4842±10	13.323±40	0.78	2546±5	2703±8	2823±4	
KV-25/6	0.30	151	270	405	0.2279±2	0.2158±3	0.4347±17	11.944±48	0.88	2327±9	2600±10	2820±4	
KV-25/7	0.15	190	947	640	0.2151±2	0.1919±2	0.1625±5	4.414±13	0.80	971±3	1715±5	2802±3	
KV-25/8	0.45	164	267	1435	0.2075±2	0.1534±2	0.5209±10	14.344±43	0.80	2703±5	2773±8	2824±3	
Гранодиорит-порфиры рудопроявления Няльм-1													
KV-26/1	0.50	352	647	2440	0.2042±2	0.1022±1	0.4818±10	13.274±40	0.89	2535±5	2699±5	2825±2	
KV-26/2	1.95	145	270	3280	0.2032±3	0.0906±2	0.4803±14	13.248±52	0.90	2529±8	2698±11	2827±3	
KV-26/3	0.50	314	513	480	0.2245±2	0.1611±2	0.4990±10	13.783±41	0.86	2610±5	2735±8	2829±3	
KV-26/4	0.40	206	589	1489	0.2075±2	0.1072±1	0.3079±6	8.489±25	0.87	1730±3	2285±7	2826±3	
KV-26/5	0.30	128	202	1753	0.2059±2	0.1289±1	0.5517±22	15.168±75	0.93	2832±11	2826±14	2821±3	
KV-26/6	0.30	105	178	722	0.2164±2	0.1628±1	0.4916±25	13.573±67	0.95	2578±13	2720±14	2828±3	

Примечание. Измерения изотопного состава и концентраций Pb и U выполнены на масс-спектрометрах MI-1201-Г и Finnigan-MAT-262.

При расчете возрастов использованы общепринятые значения констант распада урана (Steiger, Jäger, 1977).

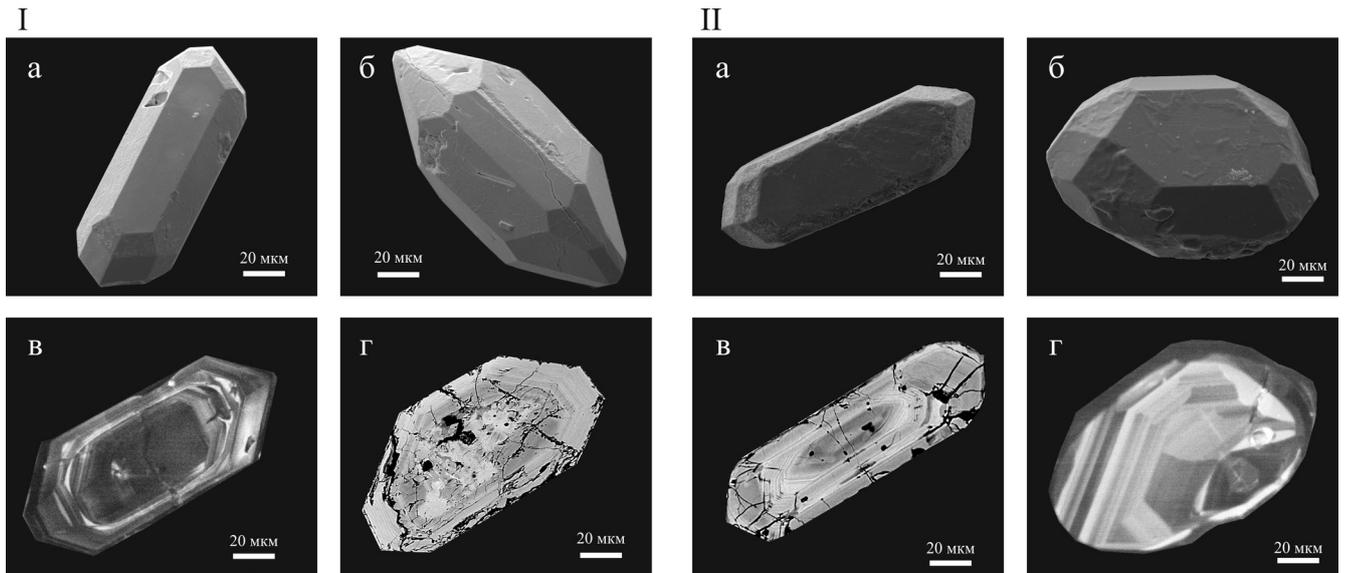
Все ошибки приведены на уровне 2σ. Погрешности соответствуют последним значащим цифрам после запятой.

\*Значения исправлены на масс-фракционирование, холостое загрязнение и обыкновенный свинец по модели (Stacey, Kramers, 1975).

Note. Measurements of isotope composition and Pb and U concentration were done with MI-1201-G mass-spectrometer and Finnigan-MAT-262. Age was calculated with common constants of the Uranium decay (Steiger, Jäger, 1977).

Errors are estimated for 2σ, accuracy correspond to the last digit of decimal places.

\*Figures are corrected for mass fractionation, blank and common lead according to Stacey-Kramers model (Stacey, Kramers, 1975).

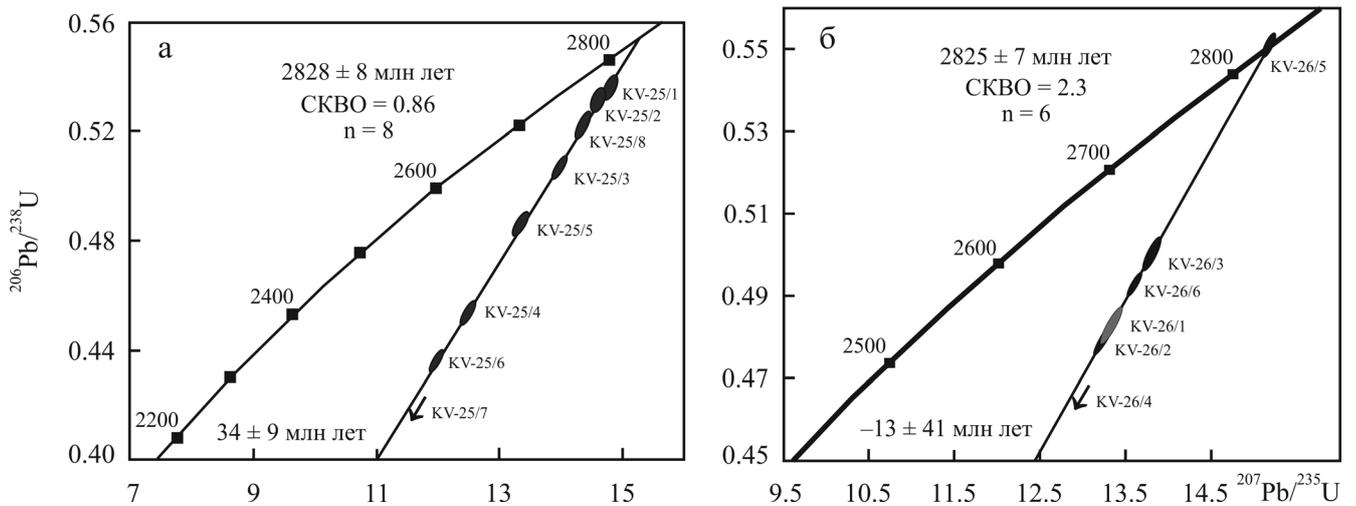


**Рис. 3.** Циркон из кварцевых порфиров рудопрооявления Оленинское (I) и гранодиорит-порфиры рудопрооявления Няльм-1 (II).

а, б – в отраженных электронах; в, г – в катодных лучах.

**Fig. 3.** Microphotograph of zircons from quartz porphyry of the Oleninskoe (I) and Nyalm-1 (II) ore occurrences.

а, б – in reflected electrons, в, г – in cathode rays.



**Рис. 4.** Диаграммы с конкордией для кварцевых порфиров рудопрооявления Оленинское (а) и для гранодиорит-порфиров рудопрооявления Няльм-1 (б).

**Fig. 4.** Concordia diagram for quartz porphyry from the Olenenskoe ore occurrence (a) and granodiorite porphyry from Nyalm-1 (б).

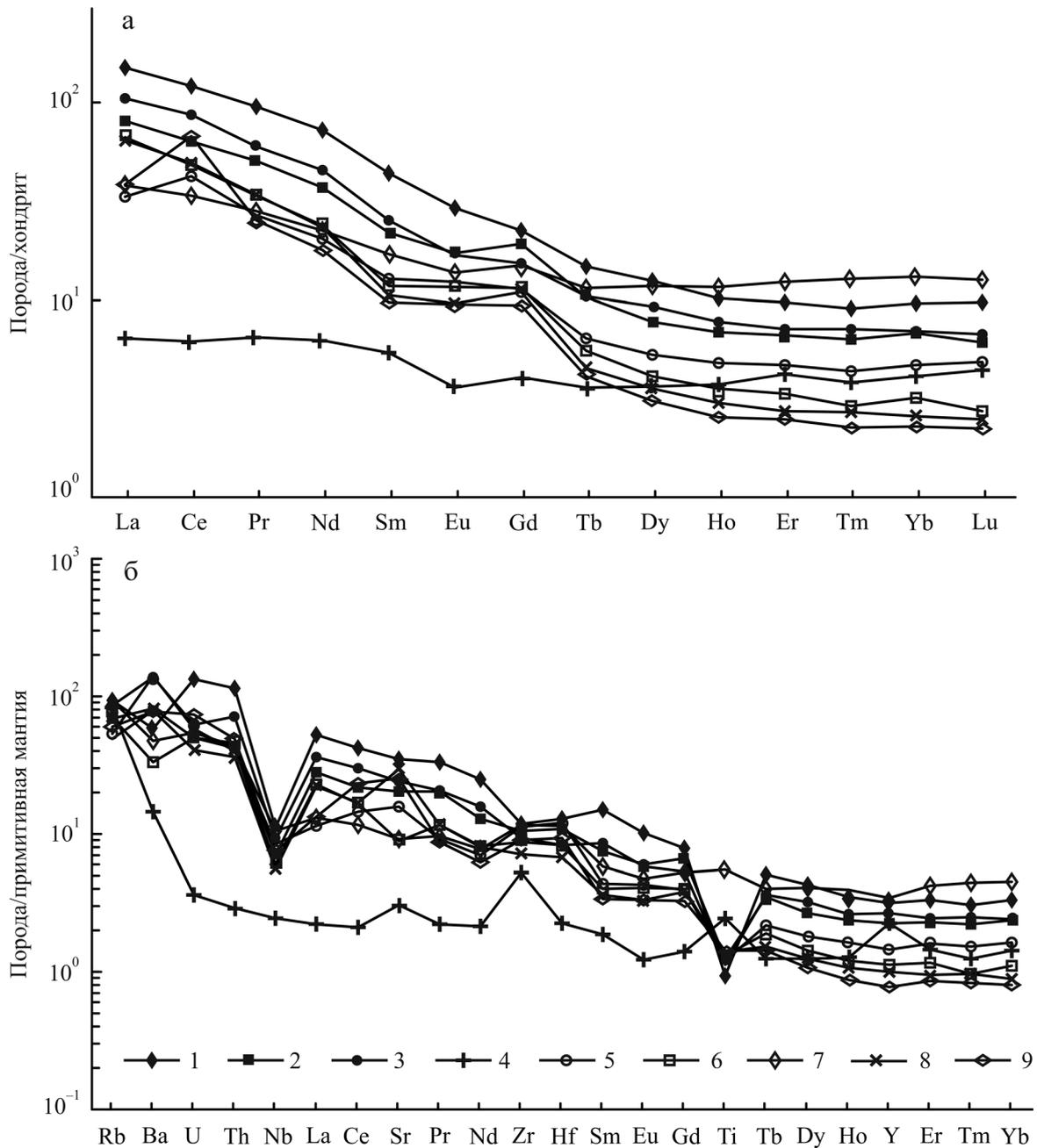
## РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Геохимическая характеристика пород

Содержания петрогенных, редких и редкоземельных элементов в породах комплекса габбро-диоритов–диоритов–диоритовых порфиритов при-

ведены в табл. 1. Содержание  $\text{SiO}_2$  в породах этого комплекса составляет 61–71 мас. % при ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) от 2.6 до 7.1 мас. %, что позволяет относить их к известково-щелочной серии.

Спектры распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в кварцевых порфирах и гранодиорит-порфирах приведены на рис. 5. Спектры распределения значительно фракционированы как для



**Рис. 5.** Спектры распределения редкоземельных элементов для пород, вмещающих рудопроявления Оленинское и Няльм-1, нормированные по хондриту (Boynnton, 1984) (а) и примитивной мантии (Palme, O'Neill, 2003) (б).

1–3 – кварцевые порфиры: 1 – KV-25, 2 – KV-25/1, 3 – ВП-43; 4 – кварц-мусковитовый метасоматит АК-25; 5–8 – гранодиорит-порфиры: 5 – KV-26, 6 – ВП-223, 7 – ВП-227, 8 – ВП-228; 9 – диорит-порфир ВП-224.

**Fig. 5.** Spectra of rare earth elements in host rocks of the Oleninskoe and Nyalm-1 ore occurrences, normalized by chondrite (Boynnton, 1984) (a) and primitive mantle (Palme, O'Neill, 2003) (b).

1–3 – quartz porphyry: 1 – KV-25, 2 – KV-25/1, 3 – ВП-43; 4 – muscovite-quartz metasomatite АК-25; 5–8 – granodiorite-porphyry: 5 – KV-26, 6 – ВП-223, 7 – ВП-227, 8 – ВП-228; 9 – diorite porphyry ВП-224.

кварцевых порфиров ( $La_n/Yb_n = 11-15$ ), так и для гранодиорит-порфиров ( $La_n/Yb_n = 8-22$ ). Для кварцевых порфиров общие содержания РЗЭ составляют 93–173 г/т, что заметно выше, чем содержания

РЗЭ в гранодиорит-порфирах (54–67 г/т), преимущественно за счет уменьшения содержаний тяжелых РЗЭ. В двух образцах гранодиорит-порфиров (ВП-226 и KV-26) отмечаются небольшие поло-

жительные аномалии Се (см. рис. 5). Для кварц-мусковитового метасоматита по гранит-порфирам (обр. АК-25), в отличие от слабоизмененных пород, характерен нефракционированный спектр распределения с низким общим содержанием РЗЭ (13 г/т – см. табл. 1, рис. 5).

На спайдер-диаграммах кварцевые порфиры и гранодиорит-порфиры имеют близкие мультиэлементные спектры с выраженными отрицательными аномалиями Nb и Ti (см. рис. 5). Кварцевые порфиры, по сравнению с гранодиорит-порфирами, обогащены Th, U (обр. ВП-43) и тяжелыми РЗЭ. Спектр кварц-мусковитового метасоматита (обр. АК-25) резко отличается от спектров пород, не затронутых или слабо затронутых процессами метасоматоза, и выделяется резко пониженными содержаниями легких и средних РЗЭ.

### Результаты Rb-Sr изотопных исследований

Rb-Sr изотопная система изучалась в кварцевых порфирах рудопрооявления Оленинское и гранодиорит-порфирах рудопрооявления Няльм-1 (табл. 3). Содержания Rb и Sr в породах рудопрооявления Оленинское варьируют, особенно в метасоматически измененных породах. Для рудопрооявления Няльм-1, во вмещающих породах которого отсутствуют признаки метасоматических процессов, была построена Rb-Sr изохронная диаграмма. По 7 аналитическим точкам валовых пород гранодиорит-порфиров и 1 точке для апатита (обр. KV-26) была получена линейная зависимость, наклон которой определяет возраст  $2779 \pm 72$  млн лет (СКВО = 3.2,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_1 = 0.70202 \pm 0.00042$  (рис. 6). Полученный изохронный возраст, вероятно, отражает закрытие Rb-Sr изотопной системы в изученных образцах после регионального метаморфизма раннего этапа.

### Результаты Sm-Nd изотопных исследований

Sm-Nd изотопные исследования были проведены для кварцевых порфиров и гранодиорит-порфиров рудопрооявлений Оленинское и Няльм-1. Полученные Sm-Nd данные для пород приведены в табл. 3. Из этих данных следует, что кварцевые порфиры и гранодиорит-порфиры образовались из протолита, возникшего из деплетированного источника. Концентрации Nd в кварцевых порфирах рудопрооявления Оленинское составляют 19–34 г/т, в гранодиорит-порфирах рудопрооявления Няльм-1 – 13–16 г/т (см. табл. 3). Для всех изученных пород получены положительные значения  $\epsilon_{\text{Nd}}(2825)$  в интервале от +0.01 до +2.63; модельные возрасты  $t_{(\text{DM})}$  находятся в пределах 3.1–2.9 млрд лет. Исключение представляет обр. ВП-227, имеющий низкие содержания Sm и Nd по сравнению с другими образцами; для него получено отрицательное значение

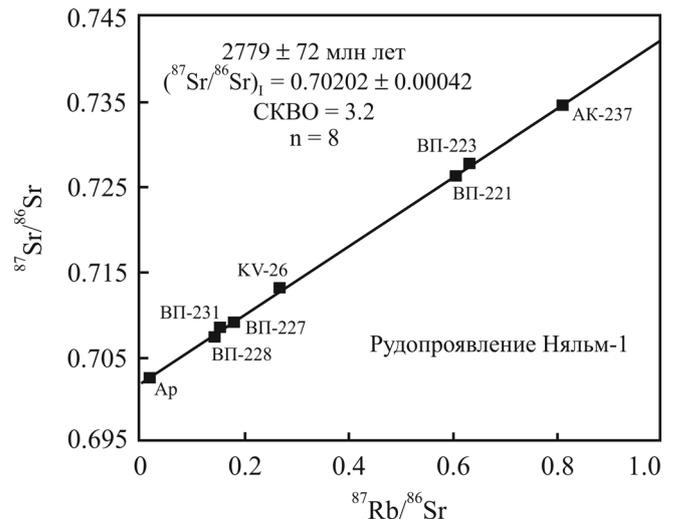


Рис. 6. Rb-Sr изохронная диаграмма для гранодиорит-порфиров рудопрооявления Няльм-1.

Fig. 6. Rb-Sr isochrone diagram for granodiorite porphyry of Nyalm-1 ore occurrence.

ние  $\epsilon_{\text{Nd}}(2825)$ :  $-0.43$ ,  $t_{(\text{DM})} = 3115$  млн лет. Смещение в область отрицательных значений изотопного состава неодима для этого образца может быть связано с присутствием в нем коровой добавки, отсутствующей в остальных образцах. Sm-Nd изотопные данные могут свидетельствовать о выплавлении первичных расплавов из мантийного источника без заметной добавки корового материала.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже отмечалось, определение возраста рудопрооявлений и месторождений золота изотопно-геохронологическими методами в архейских структурах является достаточно сложной задачей. Тем не менее определение времени рудоотложения позволяет дать надежную оценку прогноза золоторудных месторождений не только в масштабе изучаемых металлогенических провинций, но и в более широком региональном масштабе. В связи с этим обоснованно ставятся вопросы и предлагаются пути решения проблем возрастной позиции и генезиса золоторудных месторождений и рудопрооявлений в архейских зеленокаменных поясах Фенноскандинавского щита (Самсонов и др., 2011; Иващенко, Голубев, 2011; Бортников и др., 2012).

При формировании минерализованных зон в архейских структурах часто задействовано несколько золоторудных процессов, действующих как одновременно, так и разорванных во времени. Поэтому до начала проведения изотопно-геохронологических исследований необходимо решить ряд задач: 1) выделить минеральные ассоциа-

**Таблица 3.** Rb-Sr и Sm-Nd изотопные данные для пород рудопроявлений золота Оленинское и Няльм-1  
**Table 3.** Pb-Sr and Sm-Nd isotope data from host rocks of Oleninskoe and Nyalm-1 ore occurrences

Номер обр.	Порода	Rb, г/г	Sr, г/г	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$I_{\text{Sr}}(2750)$	Sm, г/г	Nd, г/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	U-Pb возраст циркона, млн лет	$t_{\text{DM}}^*$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
Рудопроявление Оленинское													
KV-25	Кв. порфир	47.06	497.2	0.2670	0.71285±12	0.70190	3.37	18.96	0.1076	0.511090±20	2825	2944	+2.20
KV-25/1	То же	40.85	477.5	0.2414	0.71260±14	0.70270	3.50	19.55	0.1082	0.511124±7	2825**	2914	+2.62
ВП-43	"-	64.86	150.4	1.2167	0.75133±16	0.70288	6.22	34.34	0.1094	0.511140±12	2825**	2924	+2.51
AK-25	Кварц-мусковитовый метасоматит	55.29	125.8	1.2400	0.78002±15	0.73064	0.74	3.008	0.1488	0.512032±26	-	-	-
Рудопроявление Няльм-1													
KV-26	Гранодиорит-порфир	45.67	483.6	0.2664	0.71308±13	0.70247	2.65	13.48	0.1189	0.511189±11	2825	3134	+0.01
ВП-221	"-	61.44	285.6	0.6070	0.72614±14	0.70197	2.40	14.88	0.0975	0.510826±8	2825**	3032	+0.70
ВП-223	"-	46.14	206.7	0.6297	0.72768±14	0.70121	2.22	13.50	0.0994	0.510935±5	2825**	2940	+2.13
ВП-228	"-	41.89	827.2	0.1429	0.70749±14	0.70180	2.46	15.95	0.0931	0.510821±7	2825**	2930	+2.20
ВП-231	"-	38.44	725.7	0.1495	0.70774±19	0.70179	2.43	15.36	0.0955	0.510796±6	2825**	3020	+0.84
ВП-227	"-	40.33	628.2	0.1811	0.70899±12	0.70178	1.88	10.87	0.1008	0.510829±7	2825**	3115	-0.43
AK-237	"-	88.67	308.4	0.8112	0.73421±15	0.70191	2.61	14.68	0.1073	0.511106±18	2825**	2913	+2.63
KV-26A	Апатит	2.03	588.4	0.0098	0.70346±12	0.70307	-	-	-	-	-	-	-

\*Модельный возраст рассчитан по отношению к деплетированной мантии с возрастом 4.55 млрд лет и современными параметрами  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2136$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513151$  (Goldstein, Jacobsen, 1988).

Погрешности приведены на уровне  $2\sigma$  и соответствуют последним значащим цифрам после запятой.

\*\*Предполагаемый возраст.

\*Model age is calculated for depleted mantle of 4.55 billion years age and modern parameters  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2136$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513151$  (Goldstein, Jacobsen, 1988). Errors are estimated for  $2\sigma$ , accuracy correspond to the last digit of decimal places.

\*\*Estimated age.

ции, с которыми связана золоторудная минерализация; 2) установить тектоно-метаморфические процессы рудогенеза, приводящие к возникновению этих ассоциаций; 3) подобрать наиболее эффективные методы изотопно-геохронологического анализа для определения возраста того или иного процесса при формировании месторождения.

Для установления возраста кварцевых порфиров и гранодиорит-порфиров, вмещающих изученные рудопоявления, использован U-Pb метод, который позволил надежно установить возраст циркона, образованного при магматической кристаллизации из расплава. А.Б. Вревским (2012) в лейкократовых гранодиоритах, вмещающих рудопоявление Няльм-1, были выделены две генерации циркона, которые были датированы на ионном микрозонде SHRIMP-II. Полученные возрасты  $1775 \pm 29$  и  $2774 \pm 10$  млн лет для этих генераций интерпретируются им как магматическая и ксеногенная соответственно. В изученных нами гранодиорит-порфирах присутствует большое количество циркона только одной генерации, возраст которой составил  $2825 \pm 7$  млн лет. Морфологические и изотопные характеристики (см. рис. 3, II и 4) датированного нами циркона отражают его кристаллизацию из магматического расплава, поэтому мы принимаем неоархейский возраст гранодиорит-порфиров.

Для дополнительной оценки возраста пород, вмещающих рудопоявление Няльм-1, мы использовали Rb-Sr изохронный метод по породам в целом. В целях определения времени закрытия Rb-Sr изотопной системы в гранодиорит-порфирах были выбраны образцы пород, не затронутых метасоматическими процессами. Для метасоматически измененных пород рудопоявления Оленинское применение такого подхода видится нам бесперспективным вследствие ряда ограничений. К числу таких ограничений можно отнести значительные вариации в содержаниях Rb и Sr в изученных образцах, ограниченный набор минералов, которые могли бы быть использованы при Rb-Sr изохронном методе, а также разные температуры закрытия Rb-Sr изотопных систем этих минералов (Горохов, 1987; Фор, 1989; Костицын, Петрова, 2004). Тем не менее следует сказать, что иногда использование Rb-Sr метода для минералов, выделенных из метаморфических или метасоматических пород, в целях получения возраста наложенного процесса может быть эффективным, как это было продемонстрировано для ряда месторождений Карельской провинции (Ларионова и др., 2013). Rb-Sr изохронный возраст  $2779 \pm 72$  млн лет, полученный по валовым пробам метасоматически неизмененных пород, подтверждает правомочность отнесения первого этапа метаморфизма к архею. Таким образом, за нижнюю границу временного интервала формирования рудопоявлений золота мы принимаем значения возраста интрузий кварцевых порфиров  $2828 \pm 8$  млн лет

и гранодиорит-порфиров  $2825 \pm 7$  млн лет. Верхняя граница обоснована пересечением тел рудоносных метасоматитов пегматитовыми жилами на рудопоявлении Оленинское (Галкин, 2002; Калинин, 1991) с возрастом  $2454 \pm 8$  млн лет (Кудряшов и др., 2015). Формирование метасоматитов, с которыми связана золоторудная минерализация, происходило на регрессивной стадии раннего этапа метаморфизма (Глебовицкий, Бушмин, 1983). Этому этапу метаморфизма, вероятно, отвечает изохронный Rb-Sr возраст  $2779 \pm 72$  млн лет, который наиболее близок возрасту золоторудной минерализации. Неоархейский возраст минерализации подтверждается и ранними Pb-Pb изотопными исследованиями пирита и галенита рудопоявления Оленинское, согласно которым их возраст оценивается в 2.8–2.6 млрд лет (Пушкарев, 1990). Для безрудных ставролит-кордиеритовых метасоматитов по породам поросозерской серии, вмещающим южную зону Оленинского рудопоявления, получен U-Pb (SHRIMP-II) возраст по циркону  $2629 \pm 64$  млн лет (Астафьев, Воинова, 2011).

Значения возраста 1965–1900 млн лет, полученные K-Ar методом по мусковиту из рудопоявлений Пеллапахк и Оленинское (Волков, Новиков, 2002), близки к значениям, полученным ранее K-Ar и Rb-Sr методами по мусковитам из ЗКП Колмозеро-Воронья (1.9–1.6 млрд лет) (Морозова и др., 1979; Другова и др., 1982). Во всех указанных публикациях, кроме статьи (Волков, Новиков, 2002), эти значения интерпретируются как время позднего этапа метаморфизма кианит-силлиманитовой фации, локально проявленного в северо-западной части ЗКП Колмозеро-Воронья.

Вполне вероятно, что на палеопротерозойском этапе метаморфизма на участках проявления метасоматических процессов происходило нарушение K-Ar и Rb-Sr изотопно-геохимических систем в калиевых минералах, которые имеют более низкие температуры закрытия этих систем. Не исключено, что с наложенными метасоматическими процессами этого этапа связано и некоторое переотложение рудного вещества, описанного для Cu-Mo порфирового рудопоявления Пеллапахк, которое расположено в этом же поясе в непосредственной близости от рудопоявления Оленинское (Калинин, Галкин, 2012). Данное явление на золоторудных проявлениях, если и имело место, то играло незначительную роль, о чем свидетельствуют геологические наблюдения. Кроме того, установлено, что рудная минерализация формировалась в высокотемпературных условиях, близких к максимальным значениям температуры раннего этапа метаморфизма:  $650\text{--}470^\circ\text{C}$  для арсенопирит-пирротиновой минерализации и  $500\text{--}300^\circ\text{C}$  для золото-серебро-галенит-сульфосольной ассоциации (Белолипецкий и др., 1987; Галкин, 2006). Следовательно, вряд ли следует предполагать существенное изменение мине-

рального и химического состава этой минерализации под воздействием процессов с близкой или даже более низкой температурой (390–430°C) на палеопротерозойском этапе (Петров и др., 1984).

## ВЫВОДЫ

1. Рудопроявления золота Оленинское и Няльм-1 пространственно и генетически связаны с единым комплексом малых интрузий габбро-диоритов–диоритов–гранодиорит-порфиров и кварцевых порфиров. Возраст внедрения интрузий комплекса определен равным  $2828 \pm 8$  млн лет для кварцевых порфиров рудопроявления Оленинское и  $2825 \pm 7$  млн лет для гранодиорит-порфиров рудопроявления Няльм-1.

2. Развитие золоторудной минерализации на рудопроявлениях Оленинское и Няльм-1 происходило после внедрения малых интрузий комплекса габбро-диоритов–гранодиорит-порфиров–гранит-порфиров  $\approx 2.83$  млрд лет назад, но до внедрения турмалиновых гранитов и редкометалльных пегматитов  $\approx 2.5$  млрд лет назад. Рудопроявления формировались в ходе регионального гидротермально-метасоматического преобразования пород на регрессивной стадии неархейского регионального метаморфизма. Rb-Sr изотопный возраст гранодиорит-порфиров и апатита рудопроявления Няльм-1 составил  $2779 \pm 72$  млн лет и интерпретируется как возраст указанных преобразований.

3. Sm-Nd изотопные данные для кварцевых порфиров и гранодиорит-порфиров, вмещающих рудопроявления Оленинское и Няльм-1, свидетельствуют о выплавлении первичных расплавов из мантийного источника с  $\epsilon_{Nd} = +0.01 \dots +2.63$  без заметной добавки корового материала.

Авторы благодарны академику РАН Ф.П. Митрофанову и Т.Б. Баяновой (ГИ КНЦ РАН) за всестороннюю поддержку данного исследования, В.В. Балаганскому (ГИ КНЦ РАН) за плодотворное обсуждение, ценные советы и помощь в подготовке статьи, а также Н.Н. Галкину (ЗАО “Black Fox Resources”) и О.В. Казанову (ОАО “Центрально-Кольская экспедиция”) за предоставленные геологические материалы.

*Исследования проведены при поддержке грантов РФФИ ОФИ-М-И-05-12055 и В-0500493, Программ ОНЗ РАН № 2 и № 4 и Программы № 27 фундаментальных исследований Президиума РАН.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астафьев Б.Ю., Воинова О.А. (2011) Региональные флюидонасыщенные зоны восточной части Балтийского щита как индикатор глубинных процессов формирования земной коры. *Проблемы плейт- и плюм-*

*тектоники в докембрии: мат-лы III Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия.* Санкт-Петербург: Ин-т геологии и геохронологии докембрия РАН, 19-22.

Баянова Т.Б. (2004) Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 176 с.

Белолипецкий А.П., Гаскельберг В.Г., Гаскельберг Л.А. и др. (1980) Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова. Л.: Наука, 240 с.

Белолипецкий А.П., Калинин А.А., Петров С.И. (1987) Минералогия и геохимия метасоматитов зон глубинных разломов. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 115 с.

Бельков И.В., Батиева И.Д., Загородный В.Г. и др. (1982) Геотектоническое развитие и эволюция магматизма, метаморфизма и эндогенного рудообразования северо-восточной части Балтийского щита. *Геология, петрология и корреляция кристаллических комплексов Европейской части СССР.* Л.: Наука, 195-202.

Беляев О.А., Загородный В.Г., Петров В.П., Волошина З.М. (1977) Фации регионального метаморфизма Кольского полуострова. Л.: Наука, 88 с.

Беляев О.А., Петров В.П. (2002) Новые аспекты в изучении истории метаморфизма и метаморфической структуры докембрия северо-восточной части Балтийского щита. *Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. Т. 2. Апатиты,* 195-207.

Бортников Н.С., Коваленко В.И., Самсонов А.В. и др. (2012) Фундаментальные основы формирования золоторудной и редкометалльной ресурсной базы России: модели месторождений, источники рудного вещества и геодинамические обстановки. *Фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы).* М.: ГЕОС, 9-64.

Волков А.В., Новиков И.А. (2002) Золото-сульфидное месторождение Оленинское (Кольский п-ов, Россия). *Геология руд. месторождений.* 44(5), 412-424.

Вревский А.Б. (1989) Петрология и геодинамические режимы развития архейской литосферы. Л.: Наука, 144 с.

Вревский А.Б. (2012) Возраст и изотопная геохимия рудовмещающих гранодиоритов золоторудного месторождения Няльм-1 (зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья, Кольский полуостров). *Докл. АН.* 442(2), 223-227.

Гавриленко Б.В., Никитин И.В., Зозуля Д.Р. и др. (2002) Геология, тектоника, возраст и металлогения архейской шовной зоны Колмозеро-Воронья, Кольский регион. *Вестн. МГТУ.* 5(1), 43-60.

Галкин Н.Н. (2002) Минералого-геохимическая характеристика Оленинского золоторудного проявления, архейская зона Колмозеро-Воронья. *Геология и геоэкология. Исследования молодых. Т. 2: мат-лы XIII молодеж. конф. памяти К.О. Кратца.* Апатиты: Апатит-Медиа, 33-39.

Галкин Н.Н. (2006) Геология и минералогия золоторудных проявлений Пеллапах-Оленинского рудного узла. Кольский полуостров. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Апатиты, 22 с.

Глебовицкий В.А., Бушмин С.А. (1983) Послемигматитовый метасоматоз. Л.: Наука, 215 с.

- Горохов И.М. (1987) Рубидий-стронциевые системы в регионально метаморфизованных породах. *Изотопное датирование процессов метаморфизма и метасоматоза*. М.: Наука, 3-19.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2010) Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Сер. Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-(35), 36 – Мурманск. Объяснительная записка. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 281 с.
- Другова Г.М., Глебовицкий В.А., Дук В.Л. и др. (1982) Высокоградиентные режимы метаморфизма в развитии земной коры. Л.: Наука, 229 с.
- Дудкин Н. (2014) Сырьевая база и мировой рынок золота. *Золото и технология*. (1), 16-20.
- Иващенко В.И., Голубев А.И. (2011) Золото и платина Карелии: формационно-генетические типы оруденения и перспективы. Петрозаводск, 370 с.
- Калинин А.А. (1991) Минералогия проявлений серебра в северо-восточной части Балтийского щита. Апатиты, 47 с.
- Калинин А.А., Галкин Н.Н. (2012) Докембрийское медно-молибден-порфиоровое месторождение Пеллапахк (зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья). *Вестн. Кольского НЦ РАН*. 1, 80-92.
- Калинин А.А., Кудряшов Н.М., Галкин Н.Н. (2010) Рудопроявления золота, меди и молибдена в зеленокаменном поясе Колмозеро-Воронья (Кольский полуостров): геологические особенности и возраст. *Золото Кольского полуострова и сопредельных территорий: мат-лы Всерос. конф.* Апатиты, 51-92.
- Костицын Ю.А., Петрова А.Ю. (2004) Устойчивость Rb-Sr изотопной системы магматических горных пород к наложенным процессам. *Геохимия*. (8), 826-834.
- Кудряшов Н.М., Гавриленко Б.В., Апанасевич Е.А. (1999) Возраст пород архейского зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья: новые U-Pb данные. *Геология и полезные ископаемые Северо-Запада и Центра России: мат-лы Х молодеж. конф. памяти К.О. Кратца*. Апатиты, 66-70.
- Кудряшов Н.М., Лялина Л.М., Апанасевич Е.А. (2015) Возраст редкометалльных пегматитов месторождения Васин-Мыльк (Кольский регион): результаты геохронологического U-Pb- исследования микролита. *Докл. АН*. 461(4), 437-441.
- Кудряшов Н.М., Петровский М.Н., Мокрушин А.В., Елизаров Д.В. (2013) Неоархейский санукитоидный магматизм Кольского региона: геологические, петрохимические, геохронологические и изотопно-геохимические данные. *Петрология*. 21(4), 389-413.
- Кулешевич Л.В., Фурман В.Н. (2009) Золоторудное месторождение Таловейс в Костомукшской докембрийской зеленокаменной структуре (Карелия). *Геология руд. месторождений*. 51, 58-76.
- Ларионова Ю.О., Самсонов А.В., Носова А.А. (2004) Rb-Sr геохронология и изотопная геохимия рудовмещающих пород и околорудных метасоматитов мезотермального Au-месторождения Таловейс, Западная Карелия. *Докл. АН*. 396(2), 239-243.
- Ларионова Ю.О., Самсонов А.В., Шатагин К.Н., Носова А.А. (2013) Изотопно-геохронологические свидетельства палеопротерозойского возраста золоторудной минерализации в архейских зеленокаменных поясах Карелии (Балтийский щит). *Геология руд. месторождений*. 55(5), 374-396.
- Минц М.В., Глазнев В.Н., Конилов А.Н. и др. (1996) Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры. М.: Науч. мир, 278 с.
- Морозова И.М., Другова Г.М., Спрингсон В.Д. (1979) О последовательности этапов метаморфизма в серии полмос-порос на Кольском полуострове (по данным K-Ar метода). *Петрология и корреляция кристаллических комплексов Восточно-Европейской платформы: мат-лы III петрогр. совещ.* Киев: Наук. думка, 172.
- Никитин И.В. (1980) Тектоника зоны Колмозеро-Воронья в свете концепции горизонтальных движений. *Региональная тектоника раннего докембрия СССР*. Л.: Наука, 104-111.
- Новоселов К.А., Белогуб Е.В., Ермолина-Кутсие О.С., Михайлов А.Б. и др. (2014) Минералогия золоторудных проявлений зеленокаменного пояса Кухмо (Финляндия). *Литосфера*. (2), 115-124.
- Петров В.П., Гарифулин Л.Л., Реженева С.А. (1984) К вопросу о развитии процессов метаморфизма в зоне Колмозеро-Воронья (Кольский полуостров). *Геология и история формирования докембрийских структур Кольского полуострова*. Апатиты: Кольский фил. АН СССР, 46-55.
- Прияткина Л.А., Дагелайский В.Б. (1965) Метаморфизм свит полмос и порос. *Граниты Кольского полуострова и Карелии*. М.: Тр. ЛАГЕД АН СССР, 72-83.
- Пушкарев Ю.Д. (1990) Мегациклы в эволюции системы кора-мантия. Л.: Наука, 216 с.
- Пушкарев Ю.Д., Кравченко Э.В., Шестаков Г.И. (1978) Геохронологические реперы докембрия Кольского полуострова. Л.: Наука, 136 с.
- Самсонов А.В., Ларионова Ю.О., Носова А.А., Ручьев А.М. (2011) Проблемы возрастной позиции и генезиса золоторудной минерализации в архейских зеленокаменных поясах Карельского блока: опыт комплексных реконструкций. <http://www.minsoc.ru/E2-2011-10-0/>
- Фор Г. (1989) Основы изотопной геологии. М.: Мир, 590 с.
- Boynnton W.V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare earth element geochemistry*. Henderson P. (Ed.), Amsterdam: Elsevier Sci. Publ. Co., 63-114.
- FINGOLD. (2009) A public database on gold deposits in Finland. P. Eilu., H. Pankka. *Geological Survey of Finland*. <http://en.gtk.fi/ExplorationFinlandCommodities/Gold/depositlist.html>
- Geological development, gold mineralization and exploration methods in the late Archean Hattu schist belt, Ilomantsi, eastern Finland. (1993) *Espoo. Spec. Paper. Geol. Surv. Finl.* (17), 386 p.
- Gold in the Central Lapland Greenstone Belt. (2007) (Ed. V.J. Ojala.). *Geol. Surv. of Finland. Special Paper* 44, 267 p.
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B. (1988) Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.* 87, 249-265.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M. et al. (1998) Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.* 13, 7-27.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Robert F., Hart C.J.R. (2003) Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current

- understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Econ. Geol.* **98**, 1-29.
- Groves D.I., Phillips G.N. (1987) The genesis and tectonic control on Archean gold deposits of the Western Australian Shield – a metamorphic replacement model. *Ore Geol. Rev.* **2**, 287-322.
- Kerrick R., Goldfarb R., Groves D. et al. (2000) The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science China (Series D)*. **43**, 1-6.
- Kerrick R., Wyman D. (1990) Geodynamic setting of mesothermal gold deposits: An association with accretionary tectonic regimes. *Geol.* **18**, 882-885.
- Krogh T.E. (1973) A low-contamination method for hydrothermal dissolution of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **37**, 485-494.
- Kudryashov N.M., Bayanova T.B., Gavrilenko B.V. et al. (2001) Archean geochronology of the Kola region (north-eastern Baltic Shield). *4-th Intern. Archaean Symposium: Extended Abstr.* AGSO Geoscience Australia, Record. **37**, 58-60.
- Ludwig K.R. (1991) ISOPLOT – A plotting and regression program for radiogenic-isotope data, version 2.56. Openfile report 91-445. US Geol. Surv., 40 p.
- Ludwig K.R. (1999) ISOPLOT/Ex – A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 2.05. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*. (1a).
- Metallogeny and tectonic evolution of the Northern Fennoscandian Shield. (2008) (Eds V. Juhani Ojala and Markku Iljina). Guidebook 33 IGC excursion No. 15, August 15–21. Oslo, 113 p.
- Palme H., O'Neill H.St.C. (2003) Cosmochemical estimates of mantle composition. *Treatise Geochem.* **2**, 1-38.
- Stacey J.S., Kramers J.D. (1975) Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.* **26**(2), 207-221.
- Steiger R.H., Jäger E. (1977) Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.* **36**(3), 359-362.

Рецензент В.Н. Огородников

## Gold occurrences in the Kolmozero-Voronya Archean greenstone belt, Kola region: Geological, mineralogical, geochronological and isotope-geochemical characteristics

N. M. Kudryashov, A. A. Kalinin, L. M. Lyalina, P. A. Serov, D. V. Elizarov

*Geological Institute, Kola Science Centre of RAS*

A multidisciplinary study of the Oleninskoe and Nyalm-1 gold occurrences located in the Kolmozero-Voronya greenstone belt (Kola region) has been carried out. These gold occurrences are interpreted as orogenic and connected with a complex of gabbrodiorite–diorite–granodiorite–quartz porphyry minor intrusions. U-Pb age of zircon from a quartz porphyry dyke in the Oleninskoe occurrence is  $2828 \pm 8$  Ma. An identical age of  $2825 \pm 7$  Ma has been yielded by zircon from a granodiorite porphyry hosting the Nyalm-1 gold mineralization. The gold mineralization was formed in the Neoproterozoic time after the crystallization of minor intrusions  $\approx 2.83$  Ga ago and before the formation of tourmaline-bearing granites and rare-metal pegmatite veins (both dated at  $\approx 2.5$  Ga), during hydrothermal alteration of rocks at the retrograde stage of regional metamorphism. Rb-Sr isochron age  $2779 \pm 72$  Ma, obtained for the whole rock samples and apatite from the Nyalm-1 granodiorite porphyry, probably is close to the age of this event. Values of  $\epsilon_{Nd}(t)$  calculated for granodiorite-porphyrates from the Oleninskoe and Nyalm-1 gold occurrences vary from +0.01 to +2.63, suggesting that their parental magma originated from a mantle source and that an addition of crust material was not significant.

Key words: *gold, isotope-geochronological study, greenstone belt Kolmozero-Voronya, Fennoscandian Shield, Neoproterozoic.*