

Возраст формирования и метаморфизма рудоносных габброноритов платинометалльного месторождения Северный Каменник (Федорово-Панский расслоенный комплекс, Кольский полуостров): новые Sm-Nd и U-Pb данные

Серов П.А.¹, Баянова Т.Б.^{1,2}, Корчагин А.У.¹

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, p.serov@ksc.ru

² Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), Москва

Аннотация. Проведено Sm-Nd и U-Pb изотопно-геохронологическое исследование рудоносных габброноритов платинометалльного месторождения Северный Каменник, расположенного в Западно-Панском массиве Федорово-Панского расслоенного комплекса Кольского полуострова. Для габброноритов, подстилающих основное рудное тело и Нижний расслоенный горизонт (НРГ) с платинометалльной минерализацией, получен Sm-Nd возраст 2498 ± 46 млн лет с $\epsilon_{Nd}(T) = -1.4$. Возраст рудоносных габброноритов НРГ с повышенными фоновыми содержаниями ЭПГ и Au составил 2484 ± 26 млн лет с $\epsilon_{Nd}(T) = -1.0$. Геохронологическое U-Pb датирование цирконов из этих образцов подтвердило полученные Sm-Nd методом результаты: возраст габброноритов НРГ – 2497 ± 6 млн лет. Изотопная Sm-Nd систематика исследованных проб подтверждает гипотезу внедрения дополнительной порции рудоносной магмы с более радиогенным изотопным составом Nd на рубеже 2.48 млрд лет, что согласуется с геологическими данными. Изотопные Sm-Nd данные по минералам метаморфического генезиса (апатит, цоизит) отражают возраст свекофенских метаморфических преобразований на рубеже 1.96–1.95 млрд лет и в пределах ошибок приближаются к оценкам времени метаморфизма в пределах Мончетундровского массива (2.1–2.0 млрд лет) и начала заложения Мончетундровского разлома на рубеже 2.0–1.9 млрд лет.

Ключевые слова: Северный Каменник, Федорово-Панский расслоенный комплекс, Sm-Nd, U-Pb, платинометалльное месторождение, мафит-ультрамафитовые интрузии.

The age of formation and metamorphism of ore-bearing gabbro-norites from the North Kamennik PGE deposit (Fedorovo-Pansky layered complex, Kola Peninsula): new Sm-Nd and U-Pb data

Serov P.A.¹, Bayanova T.B.^{1,2}, Korchagin A.U.¹

¹ Geological Institute of the Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, p.serov@ksc.ru

² Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences

Abstract. Sm-Nd and U-Pb isotopic-geochronological study of ore-bearing gabbro-norites of the Northern Kamennik PGE deposit, located in the West Pansky massif of the Fedorovo-Pansky layered complex, Kola Peninsula, was carried out. The Sm-Nd age of 2498 ± 46 Ma with $\epsilon_{Nd}(T) = -1.4$ was obtained for the gabbro-norites underlying the main ore body and Lower Layered horizon (LLH) with platinum-metal mineralization. The age of the ore-bearing gabbro-norites of LLH with elevated background PGE and Au contents was 2484 ± 26 Ma with $\epsilon_{Nd}(T) = -1.0$. The geochronological U-Pb dating of zircons from these samples confirmed the results obtained by the Sm-Nd method: the age of the LLH gabbro-norites is 2497 ± 6 Ma. The Sm-Nd isotopic systematics of the examined samples confirms the hypothesis of introduction of an additional portion of ore-bearing magma with a more radiogenic Nd isotopic composition at the age of 2.48 Ga, which is consistent with the geological data. The Sm-Nd isotopic data on the minerals of metamorphic genesis (apatite, zoisite) reflect the age of the Svecofennian metamorphic transformations at the turn of 1.96–1.95 Ga and, within errors, approach the estimates of the metamorphism time within the Monchetundra massif (2.1–2.0 Ga) and the beginning of the Monchetundra fault at the turn of 2.0–1.9 Ga.

Keywords: Northern Kamennik, Fedorovo-Pansky layered complex, Sm-Nd, U-Pb, PGE deposit, mafic-ultramafic intrusions.

Введение

Среди более чем 140 расслоенных интрузий Европы (Smith, Maier, 2021) месторождения Кольского региона являются одними из крупнейших. С ростом инвестиционной привлекательности

Арктической зоны России повышается и внимание крупного бизнеса к рудным объектам северо-востока Балтийского щита – в последние годы активно обсуждаются перспективы разработки месторождений платиновых металлов, среди которых Федорово-Панский расслоенный комплекс является безусловным лидером с крупнейшими в Европе месторождениями металлов платиновой группы. В настоящее время начаты активные подготовительные работы по его освоению, а начало добычи планируется к 2027 г. Эти экономически значимые рудные районы на протяжении длительного времени являются объектами пристального внимания ученых. Помимо промышленных задач решаются вопросы обнаружения закономерностей концентрирования рудного вещества для дальнейшего роста рудного потенциала месторождений.

Месторождение комплексных платинометалльных руд малосульфидного типа Северный Каменник утверждено в ГКЗ в 2015 г. и является на данный момент последним из выявленных и оцененных месторождений в пределах палеопротерозойского Федорово-Панского расслоенного комплекса. Оруденение сосредоточено в пределах Северного платиноносного рифа в Нижнем расслоенном горизонте массива (НРГ), который прослеживается на несколько десятков км в восточном направлении (Korchagin et al., 2009). В пределах Западно-Панского массива помимо месторождения Северный Каменник ранее было разведано и поставлено на баланс аналогичное месторождение Киевей (Корчагин и др., 2016), Первые данные о возрасте габброноритов нижнего расслоенного горизонта Западно-Панского блока интрузии были получены еще в середине 90-х годов прошлого века: 2501 ± 1.4 млн лет, 2491 ± 1.5 млн лет (Amelin et al., 1995); 2496 ± 10 млн лет (Баянова и др., 1994); 2487 ± 51 млн лет (Balashov et al., 1993). В дальнейшем, под руководством академика РАН Ф.П. Митрофанова, были определены и научно обоснованы возрастные рубежи формирования Федорово-Панского расслоенного комплекса в интервале 2526 – 2440 млн лет (Баянова, 2004; Серов, Митрофанов, 2005; Ниткина, 2006; Серов и др., 2007; Серов, 2008; Грошев и др., 2009; Серов, Екимова, 2011; Митрофанов и др., 2013; Баянова и др., 2017; Schissel et al., 2002; Bayanova et al., 2009, 2014, 2019; Mitrofanov et al., 2019; Groshev, Karykowski, 2019; Serov, 2021). Однако, несмотря на многолетнее изучение месторождений Федорово-Панского рудного комплекса, всё ещё остаются неясными многие аспекты их генезиса, длительности формирования и преобразования, а вопросы источников рудного вещества и времени поступления свежих порций рудоносных магм остаются дискуссионными. В качестве рабочей гипотезы формирования НРГ предлагается гипотеза о внедрении дополнительной инъекции свежей магмы в камеру (Корчагин и др., 2016), подтверждаемая наличием U-Pb возраста цирконов из габбро-пегматитов НРГ – 2470 ± 9 млн лет (Balashov et al., 1993; Баянова, 2004). При изучении минералогии платинометалльных руд месторождения Северный Каменник в рудном интервале были обнаружены минералы бадделеит и циркон, что послужило основанием для отбора проб и определения по этим минералам возраста вмещающих пород. Использование Sm-Nd системы породообразующих и метаморфогенных минералов предполагалось для дополнительной проверки полученных возрастов и оценки времени метаморфизма Западно-Панского массива и пород месторождения Северный Каменник.

Геологическое строение

Федорово-Панский комплекс граничит с архейским Кейвским террейном и палеопротерозойским Имандра-Варзугским рифтом (рис 1.). В северо-западной части комплекс соседствует с архейскими гнейсами, но из-за плохой обнаженности контакты не определены. На севере Федорово-Панский комплекс граничит со щелочными гранитами Белых Тундр с U-Pb возрастом по циркону 2654 ± 5 Ma (Баянова, 2004; Zozulya et al., 2005). Контакт Западно-Панского блока с вулканогенно-осадочными толщами Имандра-Варзуги в основном перекрыт четвертичными отложениями, однако бурение к югу от возвышенности Каменник выявило интенсивно метаморфизованный тектонический контакт между интрузивом и вышележащими палеопротерозойскими породами.

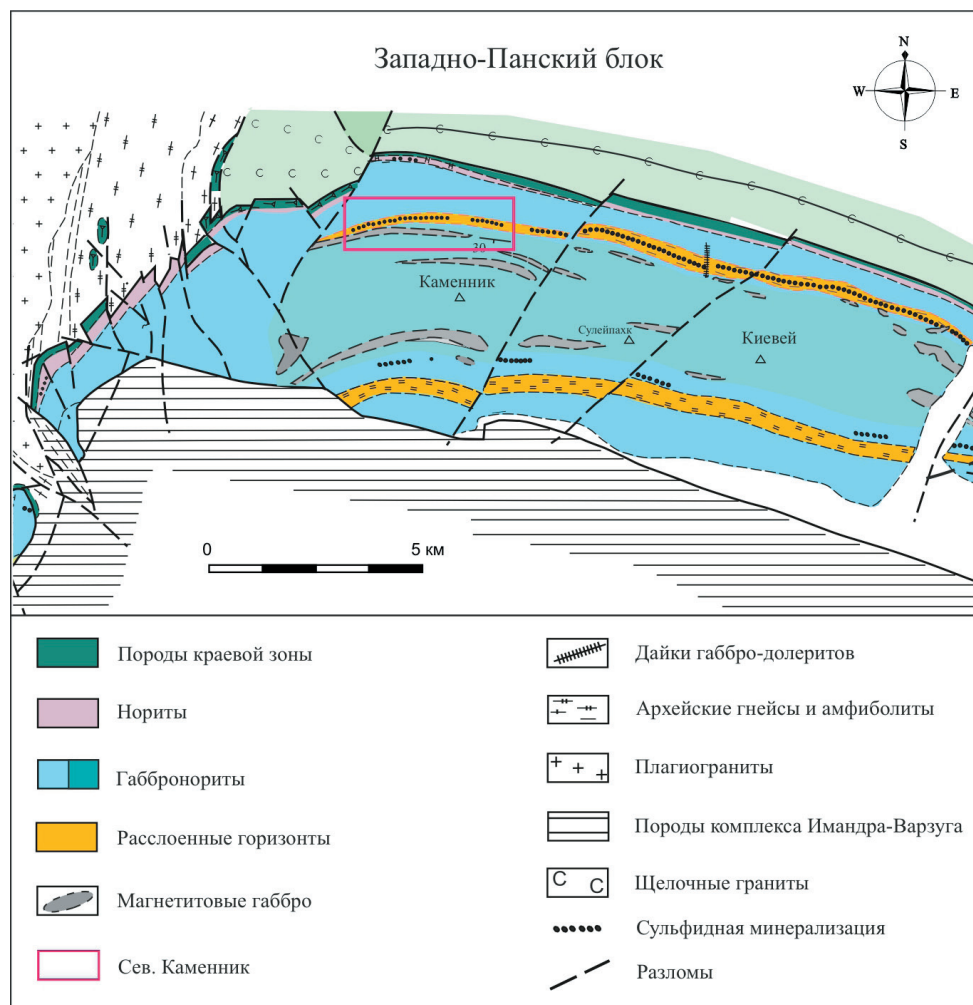


Рис. 1. Схема геологического строения Западно-Панского массива Федорово-Панского расслоенного комплекса. Составлена по материалам (Митрофанов, 2005) с авторскими изменениями.

Fig. 1. Schematic of the geological structure of the West Pan massif of the Fedorovo-Pansky layered complex. Compiled from (Mitrofanov, 2005) with the author's modifications.

Федорово-Панский комплекс сложен главным образом габброноритами с различным содержанием мафических минералов и различными структурными особенностями (Schissel et al., 2002). Снизу вверх в строении комплекса выделены следующие зоны (рис. 2):

1. Краевая зона (мощность 50–100 м) плагиоклаз-амфиболовых сланцев с реликтами массивных мелкозернистых норитов и габброноритов.

2. Такситовая зона (30–300 м), которая состоит из рудоносных габброноритов с ксенолитами пироксенитов и норитов. Зона представлена в Федоровотундровском блоке комплекса.

3. Норитовая зона (50–200 м) с кумулятивными прослоями гарцбургитов и плагиоклазосодержащих пироксенитов. Породы зоны содержат хромиты, а в нижней части наблюдается инъекционная Cu-Ni-ЭПГ минерализация.

4. Главная габброноритовая зона (около 1000 м) представляет собой мощную расслоенную серию пород с 40–80-метровым тонкорасслоенным горизонтом (НРГ) в своей верхней части. НРГ сложен контрастно чередующимися габброноритами, норитами, пироксенитами с прослоями лейкогаббро и анортозитов. Верхний расслоенный горизонт (ВРГ) наблюдается между нижней и верхней габбровыми зонами. ВРГ сложен оливин-содержащими троктолитами, норитами, габброноритами и анортозитами. U-Pb возраст пород ВРГ по циркону и бадделеиту составляет 2447 ± 12 млн лет (Баянова, 2004). Он является самым молодым из полученных для пород Федорово-Панского комплек-

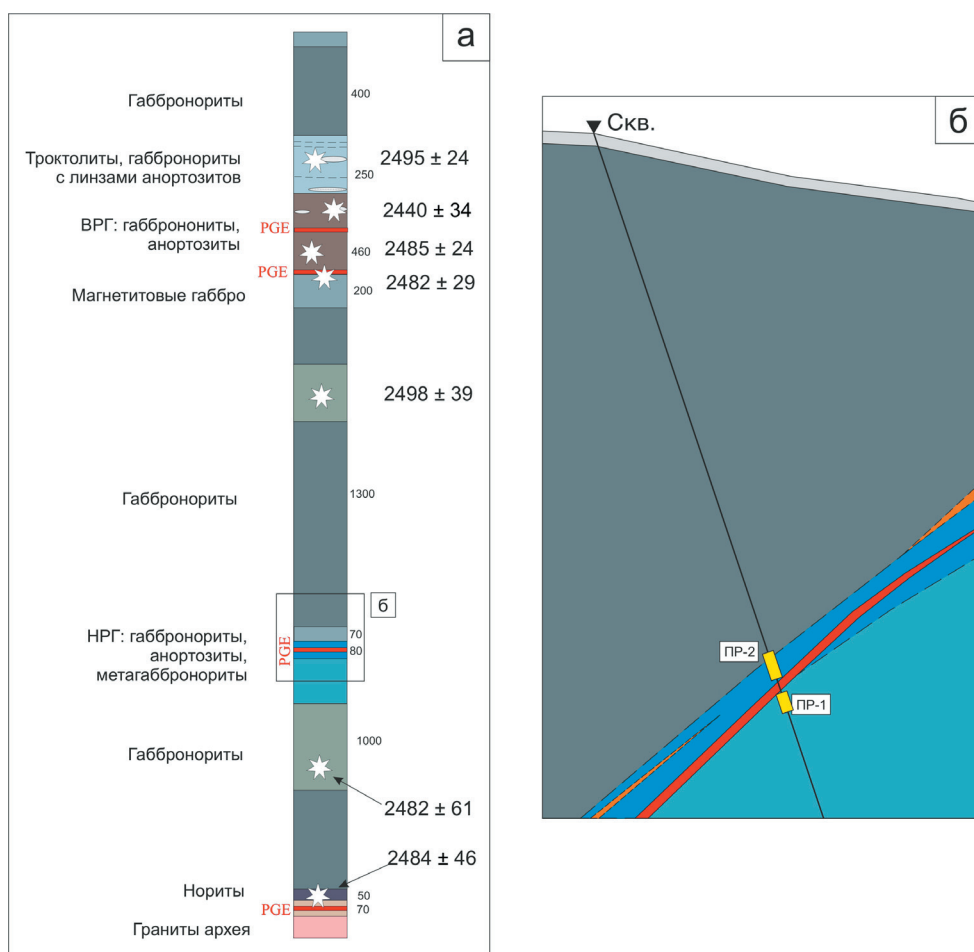


Рис. 2. Схематическая геологическая колонка Западно-Панского блока Федорово-Панского расслоенного комплекса (а) и схема участка kernового опробования (б). Указаны Sm-Nd возрасты главных разновидностей пород массива (Serov, 2021).

Fig. 2. Schematic geological column of the West Pan block of the Fedorovo-Pansky stratified complex (a) and schematic of the core sampling section (b). The Sm-Nd ages of the main rock varieties of the massif are indicated (Serov, 2021).

са, однако недавние исследования цирконов из керна скважин с помощью SHRIMP-II позволили определить более древний возраст анортозитов ВРГ – 2509.4 ± 6.2 млн лет (Groshev, Karykowski, 2019).

Месторождение Северный Каменник приурочено к НРГ в западной части Западно-Панского массива. Горизонт протягивается практически через всю площадь месторождения с запада на восток. В разрезе массива НРГ определяется частым чередованием контрастных по составу пород (анортозитов, лейкократовых габброидов, габброноритов, норитов, пироксенитов), которые выделяются на фоне преобладающих однородных массивных средне- или мелкозернистых габброноритов. Комплексная сульфидная минерализация пространственно сближена с расслоенностью пород. Для исследований из керна скважины были отобраны две пробы.

Проба ПР-1 сформирована из рядовых kernовых проб, представленных 1/4 керна, распиленного вдоль оси (диаметр бурения – 96 мм). Проба включает 5-ти метровый интервал по скважине от 126.0 до 131.0 м глубины. В пробу вошли среднезернистые габбронориты, подстилающие НРГ, без сульфидов и повышенных содержаний ЭПГ и Au. Вес пробы – 10.6 кг. Проба ПР-2 сформирована из рядовых kernовых проб и включает интервал 6.6 м по скважине от 117.0 до 123.6 м глубины. В пробу вошли среднезернистые габбронориты, анортозиты, метагаббронориты с повышенными фоновыми содержаниями ЭПГ и Au. Ниже этого интервала залегает рудное тело мощностью 1.9 м. Предполагается, что в данную пробу вошел интервал, сформированный из свежей рудоносной порции магмы. Вес пробы составил 13.4 кг.

Аналитические методы

Аналитические работы (Sm-Nd и U-Pb методы) выполнены в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ РАН (г. Апатиты).

Sm-Nd метод. Среднее значение отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте JNdi-1 за период измерений составило 0.512090 ± 13 , $n=9$. Ошибка в $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ отношениях составляет 0.3% (2σ) – среднее значение из семи измерений в стандарте BCR (Raczek et al., 2003). Погрешность измерения изотопного состава Nd в индивидуальном анализе – до 0.007 %. При расчете изохрон использовались реальные ошибки измерения изотопного состава Nd, но не ниже уровня воспроизводимости измерения изотопного состава Nd (0.003 %). Холостое внутрилабораторное загрязнение по Nd равно 0.3 нг и по Sm равно 0.06 нг. Точность определения концентраций Sm и Nd ± 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, Jacobsen, 1988) ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.513151$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.2136$).

U-Pb метод. По методике (Krogh, 1973) пробы подвергались гидротермальному разложению в концентрированной (48 %) кислоте HF при температуре 205–210 °C в течение 1–10 дней. Затем добавлялась 3.1 N HCl для растворения фторидов при температуре 130 °C в течение 8–10 часов. Навеска разделялась на две аликвоты в 3.1 N HCl для измерения изотопного состава свинца и определения концентраций свинца и урана, где использовался смешанный трассер $^{208}\text{Pb} + ^{235}\text{U}$. Выделение свинца и урана для изотопных исследований проводилось на анионите AG 1 \times 8, 200–400 меш. на колонках из фторопласта. Холостое внутрилабораторное загрязнение полного анализа составляло менее 0.1–0.08 нг для свинца и 0.01–0.04 нг для урана. U-Pb исследования проводились на семиканальном масс-спектрометре Finnigan-MAT-262 в статическом режиме. Изотопный состав свинца был измерен с помощью умножителя в режиме счета ионов, в качестве эмиттера ионов использовался силикагель. Погрешности определений изотопного состава свинца составляли 0.025 % на стандартах SRM-982. Концентрация свинца (1350–1450 °C) и урана (1450–1550 °C) измерялись в одноленточном режиме с добавлением H_3PO_4 и силикагеля по методике (Schärer et al., 1996). Все изотопные отношения исправлены на масс-дискриминацию, полученную при изучении параллельных анализов стандартов SRM-981 и SRM-982 и равную 0.12 ± 0.04 %. Погрешность в U-Pb отношениях вычислена при статистическом обсчете параллельных анализов стандартов ИГФМ-87 и принята 0.5 %, если ошибки выше, то приводятся реальные значения в таблице изотопных данных. Расчет координат точек и параметры изохроны обсчитывались по программам К. Людвига (Ludwig, 1991; 1999). Вычисление возрастов проведено по принятым величинам констант распада урана (Steiger, Jäger, 1977), ошибки даны на уровне $\pm 2\sigma$. По модели Стейси-Крамерса (Stacey, Kramers, 1975) была проведена коррекция на примесь обыкновенного свинца. Также проводилась коррекция на изотопный состав когенетичных плагиоклазов в тех случаях, где примесь обыкновенного свинца была более 10 % от общего количества свинца, и изотопные отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ были меньше 1000.

Результаты и дискуссия

1. Sm-Nd исследования

По пороодообразующим (клино-, ортопироксены, плагиоклаз), метаморфическим (апатит, цоизит) и аксессуарным (циркон, бадделеит) минералам из рудных и безрудных разновидностей пород из Северного рифа (НРГ) месторождения Северный Каменник получены Sm-Nd и U-Pb возрасты.

Фигуративные точки пороодообразующих минералов и породы в целом (WR) из безрудного габбронорита, подстилающего НРГ, на диаграмме в координатах $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ образуют линию регрессии, наклон которой соответствует возрасту 2498 ± 46 млн лет, при $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = -1.4$ и СКВО = 2.1 (рис. 3а, табл. 1). Для рудного габбронорита, характеризующегося повышенными

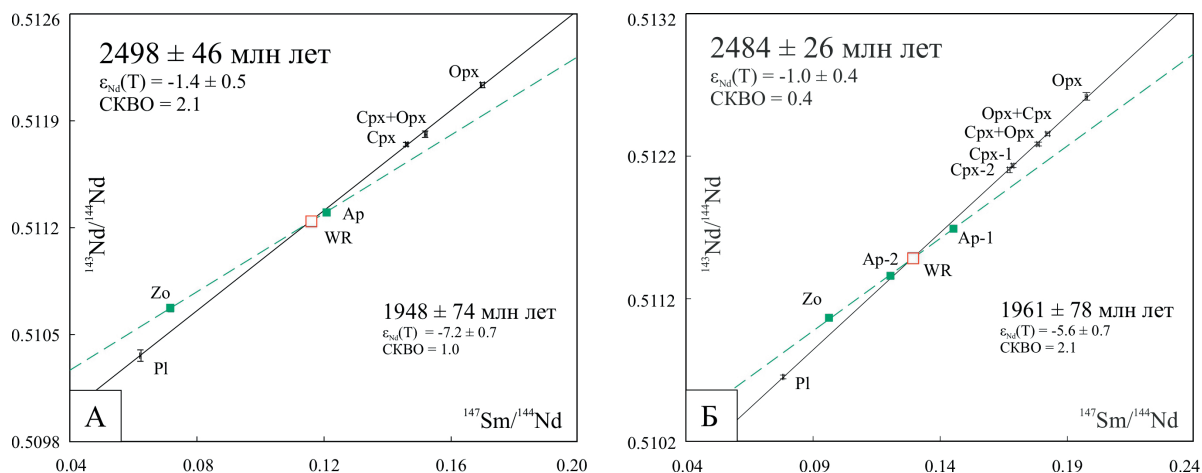


Рис. 3. Минеральные Sm-Nd изохроны для а) безрудного габбронорита (проба ПР-1), подстилающего НРГ и б) рудного габбронорита НРГ (проба ПР-2). Срх – клинопироксен; Орх – ортопироксен; Пл – плагиоклаз; Ап – апатит; Зо – цоизит; WR – порода в целом.

Fig. 3. Mineral Sm-Nd isochrones for A) barren gabbro-norite (sample PR-1) underlying LLH and B) ore gabbro-norite LLH (sample PR-2). Срх – clinopyroxene; Орх – orthopyroxene; Пл – plagioclase; Ап – apatite; Зо – zoisite; WR – whole rock.

содержаниями ЭПГ и золота, Sm-Nd изохрона по породообразующим минералам и породе определяют немногим более молодой возраст, равный 2484 ± 26 млн лет, при $\epsilon_{Nd}(T) = -1.0$ и СКВО = 0.4 (рис. 3б, табл. 1). Оба возраста близки к определениям, ранее полученным для пород НРГ двумя независимыми методами, U-Pb и Sm-Nd (Баянова и др., 2017; Серов, 2021).

Таблица 1. Результаты изотопного Sm-Nd анализа пород и минералов месторождения Северный Каменник, Федорово-Панский расслоенный комплекс

Table 1. Results of Sm-Nd isotopic analysis of rocks and minerals of the Northern Kamennik deposit, Fedorovo-Pansky layered complex

	Концентрация, мкг/г		Изотопные отношения		$T_{(DM)}$, млн лет	$\epsilon_{Nd}(T)$
	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$		
ПР-1 габбронорит, подстилающий НРГ						
WR	0.642	3.35	0.1159	0.511244 ± 12	2957	-1.3
Pl	0.131	1.277	0.0622	0.510361 ± 35		
Орх	0.198	0.702	0.1700	0.512136 ± 18		
Срх	2.47	8.97	0.1461	0.511746 ± 13		
Срх+Орх	1.235	4.61	0.1521	0.511812 ± 21		
Zo	0.221	1.859	0.0718	0.510672 ± 21		
Ап	64.2	307.1	0.1209	0.511297 ± 6		
ПР-2 рудный габбронорит (+ анортозиты и метагаббронориты)						
WR	0.936	4.38	0.1292	0.511484 ± 15	2992	-1.0
Pl	0.564	4.35	0.0783	0.510651 ± 17		
Срх-1	1.645	5.89	0.1688	0.512133 ± 8		
Срх-2	1.426	5.13	0.1674	0.512105 ± 6		
Орх	0.181	0.614	0.1977	0.512617 ± 25		
Орх+Срх	0.844	2.80	0.1824	0.512359 ± 12		
Срх+Орх	1.935	6.55	0.1786	0.512285 ± 10		
Zo	1.040	6.52	0.0964	0.511069 ± 19		
Ап-1	149.9	623.3	0.1454	0.511697 ± 5		
Ап-2	58.9	294.4	0.1209	0.511362 ± 6		

Sm-Nd данные по минералам поздних процессов (апатит, цоизит) для габброноритов месторождения Северный Каменник отражают возраст метаморфических преобразований на рубеже 1.96–1.95 млрд лет (рис. 3, табл. 1). Следует отметить, что полученные возраста в пределах ошибок приближаются к оценкам времени метаморфизма в пределах Мончегундровского массива (2.1–2.0 млрд лет) и начала заложения Мончегундровского разлома на рубеже 2.0–1.9 млрд лет (Sharkov et al., 2006; Serov, 2021). Помимо этого, полученные молодые возраста практически идентичны возрасту рудных оливиновых норитов Нюд-II (Мончеплутон) – 1940 ± 32 Ма и приближаются к возрасту переотложения руд месторождения Ахмаваара 1903 ± 24 Ма (Серов и др., 2014; Serov, 2021). Близкие отрицательные значения $\epsilon\text{Nd}(T)$ от -5.6 до -7.2 свидетельствуют о едином процессе и связаны, по-видимому, с региональной метаморфической переработкой в связи со свекофенскими событиями.

2. U-Pb исследования

Изотопная U-Pb диаграмма с конкордией для магматического циркона из габброноритов месторождения Северный Каменник определяет возраст 2500 ± 6 млн лет (рис. 4, табл. 2), который хорошо согласуется с Sm-Nd возрастом. Нижнее пересечение дискордии с конкордией отражает потерю свинца во время флюидно-термальной переработки. Ксеногенный циркон, найденный при выделении фракции цирконов из пробы рудного габбронорита имеет U-Pb возраст 3500 ± 10 млн лет. Необходимо отметить, что определение возраста этого древнего захваченного циркона расширяет географию находок палеоархейских цирконов в пределах северо-востока Балтийского щита и является важным свидетельством присутствия древнего материала.

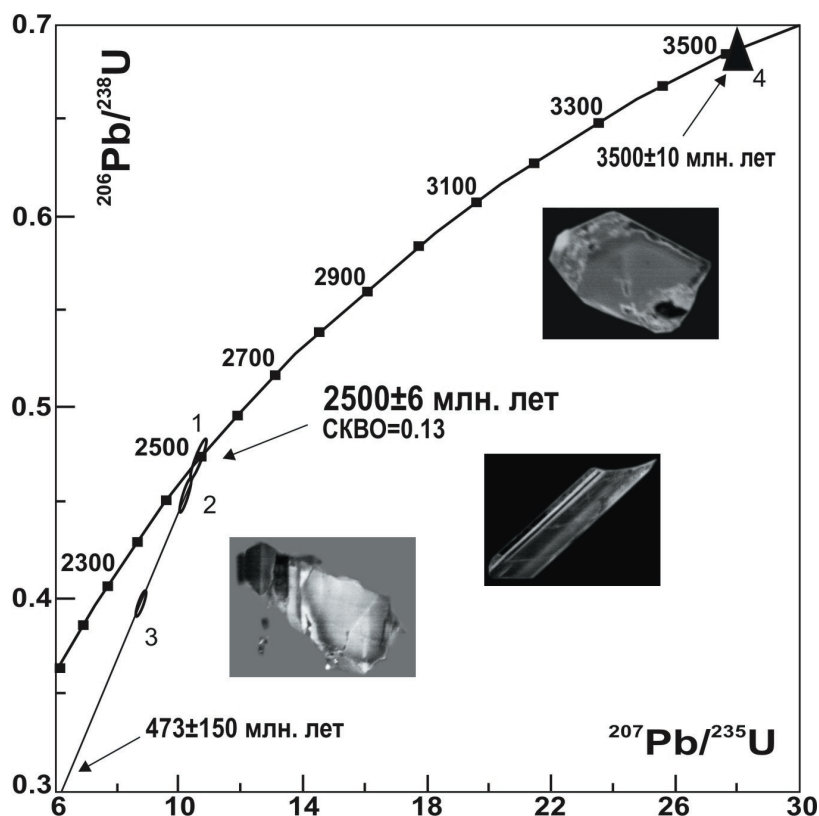


Рис. 4. Изотопная U-Pb диаграмма с конкордией для магматического (1–3) и ксеногенного (4) циркона из габброноритов месторождения Северный Каменник.

Fig. 4. U-Pb concordia for magmatic (1–3) and xenogeneous (4) zircon from gabbro-norites of the Northern Kamennik deposit.

Таблица 2. Изотопные U-Pb данные для магматического и ксеногенного циркона из безрудных габброноритов, Северный Каменник
 Table 2. U-Pb isotopic data for magmatic and xenogenous zircon from barren gabbronorites, Northern Kamennik

№	Навеска мг	Содержание, ppm		Изотопный состав свинца ¹			Изотопные отношения и возраст млн. лет ²			Rho
		Pb	U	$\frac{206\text{ Pb}}{204\text{ Pb}}$	$\frac{206\text{ Pb}}{207\text{ Pb}}$	$\frac{206\text{ Pb}}{208\text{ Pb}}$	$\frac{207\text{ Pb}}{235\text{ U}}$	$\frac{206\text{ Pb}}{238\text{ U}}$	$\frac{207\text{ Pb}}{206\text{ Pb}}$	
Ксеногенный циркон										
4	0.3	7.4	3.9	57.63	2.112	0.940	27.641	0.6736	3458	0.98
Магматический циркон										
1	0.4	47.0	70.2	1101.10	5.716	2.096	10.461	0.4639	2493	0.92
2	0.2	31.1	49.8	1350.30	6.124	2.544	9.759	0.4599	2389	0.88
3	0.2	112.7	163.7	783.69	5.683	2.089	10.444	0.4738	2454	0.99

Примечание. ¹ Все отношения скорректированы на холостое загрязнение 0.08 нг для Pb и 0.04 нг для U и масс-дискриминацию 0.12±0.04 %.

² Коррекция на примесь обыкновенного свинца определена на возраст по модели Стейси и Крамерса (Stacey, Kramers, 1975).

Таким образом, впервые с помощью двух независимых геохронологических методов установлены возрасты оруденелых и безрудных пород месторождения Северный Каменник. Полученные возрасты согласуются между собой, что подтверждает правильность и корректность геохронологических данных. Новые результаты, наряду с уже известными, расширяют понимание эволюции рудно-магматической системы Федорово-Панского расслоенного комплекса и позволяют предполагать внедрение новой порции рудоносной магмы с более радиогенным изотопным составом неодима на рубеже 2.48 млрд лет. В целом, новые данные согласуются с возрастными промышленно значимых месторождений Федорово-Панского расслоенного комплекса, для которых определены три главных рубежа – безрудный 2.53–2.51 млрд лет и два рудных 2.50–2.48 млрд лет и 2.45–4–2.44 млрд лет (Mitrofanov et al., 2019; Serov, 2021).

Заключение

Таким образом, впервые установлены U-Pb и Sm-Nd возрасты формирования и метаморфизма габброноритов Pt-Pd месторождения Северный Каменник. Полученные данные подтвердили Nd-изотопную гетерогенность рудных и безрудных разновидностей габброноритов месторождения, что, наряду с результатами геохронологического U-Pb и Sm-Nd исследования, позволяет обосновать эпизод внедрения дополнительной рудоносной магмы на рубеже 2485 млн лет.

Факторы внедрения дополнительных порций магмы имеют важнейшее значение при рудогенезе расслоенных комплексов. Геохронологически обоснованные U-Pb методом по циркону и бадделеиту и Sm-Nd по породообразующим и рудным минералам этапы формирования пород крупнейших палеопротерозойских расслоенных комплексов северо-восточной части Балтийского щита имели глобальное распространение, затрагивая в прошлом также Канадский щит. Метаморфические преобразования пород с формированием переотложенных руд на рубеже 2.0–1.9 Ga совпадали с началом свекофенских событий, широко проявленных на территории Фенноскандии.

Благодарности

Авторы благодарят Н.В. Левкович и О.Г. Шерстеникову за химическую пробоподготовку; Л.И. Коваль за дробление проб и выделение акцессорных и породообразующих минералов; О.В. Приданову за подготовку цирконов для изотопных исследований; С.Н. Дьякова и В.Б. Мартынова за проведение масс-спектрометрического анализа.

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0226-2019-0053 и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 21-17-00161.

Литература

1. Баянова Т.Б., Митрофанов Ф.П., Корчагин А.У., Павличенко Л.В. Возраст габбро-норитов нижнего расслоенного горизонта (рифа) Федорово-Панского массива (Кольский полуостров) // ДАН. 1994. Т. 337. № 11. С. 93–97.
2. Баянова Т.Б., Рундквист Т.В., Серов П.А., Корчагин А.У., Карпов С.М. Палеопротерозойский Федорово-Панский расслоенный ЭПГ-комплекс северо-восточной части Арктического региона Балтийского щита: новые U-Pb (по бадделеиту) и Sm-Nd (по сульфидным минералам) данные // ДАН. 2017. Т. 472. № 1. С. 1–5. <http://dx.doi.org/10.7868/S0869565217010145>.
3. Groshov N.Yu., Nitkina E.A., Mitrofanov F.P. Двухфазный механизм образования платинометаллических базитов Федоровотундровского массива на Кольском полуострове: новые геологические и изотопно-геохронологические данные // ДАН. 2009. Т. 427. № 5. С. 669–673.
4. Корчагин А.У., Гончаров Ю.В., Субботин В.В., Groshov N.Yu., Gabov D.A., Ivanov A.N., Savchenko E.E. Геология и вещественный состав руд малосульфидного платинометаллического месторождения Северный Каменник в Западно-Панском массиве (Кольский полуостров, Россия) // Руды и металлы. 2016. № 1. С. 42–51.
5. Митрофанов Ф.П. Новые виды минерального сырья Кольской провинции: открытые и перспективы // Смирновский сборник. Москва. 2005. С. 39–54.
6. Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Groshov N.Yu., Malich K.N., Zhiron D.V., Mitrofanov A.F. Восточно-Скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt-Pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 5. С. 357–373. <https://doi.org/10.7868/S0016777013050067>.
7. Nitkina E.A. Изотопное U-Pb датирование циркона из пород платиноносного расслоенного Федорово-Панского интрузива (Кольский полуостров) // ДАН. 2006. Т. 408. № 1. С. 87–91.
8. Серов П.А., Екимова Н.А. Возможности Sm-Nd датирования рудных процессов с использованием сульфидов // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12. № 3. С. 456–460.
9. Серов П.А. Возрастные рубежи формирования платинометаллического оруденения Федорово-Панского расслоенного интрузива по Sm-Nd и Rb-Sr изотопным характеристикам: автореф. дис. ... к.г.-м.н. Воронеж, 2008. 24 с.
10. Серов П.А., Екимова Н.А., Баянова Т.Б., Митрофанов Ф.П. Сульфидные минералы – новые геохронометры при Sm-Nd датировании рудогенеза расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузий Балтийского щита // Литосфера. 2014. № 4. С. 11–21.
11. Серов П.А., Митрофанов Ф.П. Платиноносный расслоенный Федорово-Панский интрузив (Кольский полуостров): новые Sm-Nd изохроны и изотопно-геохимические данные // ДАН. 2005. Т. 403. № 5. С. 1–4.
12. Серов П.А., Nitkina E.A., Баянова Т.Б., Митрофанов Ф.П. Сопоставление данных по датированию изотопными U-Pb и Sm-Nd методами пород ранней безрудной фазы и рудовмещающих пород платинометаллического Федорово-Панского расслоенного массива // ДАН. 2007. Т. 416. № 4. С. 530–532.
13. Amelin Yu.V., Heaman L.M., Semenov V.S. U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the Eastern Baltic Shield: Implications for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting // Precambrian Research. 1995. V. 75. P. 488–509. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00015-W](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00015-W).
14. Balashov Yu.A., Bayanova T.B., Mitrofanov F.P. Isotopic data on the age and genesis of layered basic-ultrabasic intrusions in the Kola Peninsula and Northern Karelia, North-Eastern Baltic Shield // Precambrian Research. 1993. V. 64. P. 197–205. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(93\)90076-E](https://doi.org/10.1016/0301-9268(93)90076-E).
15. 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 Planet. Sci. Lett. 2008. V. 273 (1–2). P. 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>.
16. Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material implications for crystal evolution // Earth Plan. Sci. Letters. 1988. V. 87. P. 249–265. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90013-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90013-1).
17. Groshev N.Y., Karykowski B.T. The Main Anorthosite Layer of the West-Pana Intrusion, Kola Region: Geology and U-Pb Age Dating // Minerals. 2019. V. 9. 71. <https://doi.org/10.3390/min9020071>.
18. Korchagin A.U., Subbotin V.V., Mitrofanov F.P., Mineev S.D. Kievev PGE-bearing deposit in the West Pana layered intrusion // Strategic Mineral Resources of Lapland – Base for the Sustainable Development of the North. Apatity, 2009. V. 2. P. 12–32.
19. Krogh T.E. A low-contamination method for hydrothermal dissolution of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations // Geochim Cosmochim. Acta. 1973. V. 37. P. 485–494.
20. Ludwig K. R. (a) ISOPLOT/Ex - A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 2.05 // Berkeley Geochronology Center Special Publication. No. 1a. 1999, 49 p.

21. Ludwig K.R. (b) PBDAT - A Computer Program for Processing Pb-U-Th isotope Data. Version 1.22 // Openfile report 88-542. US Geol. Surv. 1991. 38 p.
22. Ludwig K.R. ISOPLOT/Ex - A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 3.6 // Berkeley Geochronology Center Special Publication. No. 4. 2008. 76 p.
23. Mitrofanov F.P., Bayanova T.B., Ludden J.N., Korchagin A.U., Chashchin V. V., Nerovich L.I., Serov P.A., Mitrofanov A.F., Zhirov D. V. Origin and Exploration of the Kola PGE-bearing Province, in: Decrée, S., Robb, L. (Eds.), *Ore Deposits: Origin, Exploration, and Exploitation*. Wiley, 2019. pp. 1–36. <https://doi.org/10.1002/9781119290544.ch1>.
24. 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. V. 27. P. 173–79. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1998.tb00687.x>.
25. Serov P.A. Paleoproterozoic Pt-Pd Fedorovo-Pansky and Cu-Ni-Cr Monchegorsk ore complexes: age, metamorphism, and crustal contamination according to Sm-Nd data // *Minerals*. 2021. V. 11. 1410. <https://doi.org/10.3390/min11121410>.
26. Schissel, D., Tsvetkov, A.A., Mitrofanov, F.P., Korchagin, A.U., 2002. Basal platinum-group element mineralization in the Federov Pansky Layered mafic intrusion, Kola Peninsula, Russia. *Economic Geology*. V. 97. P. 1657–1677. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.8.1657>.
27. Schärer U., Wilmarth E., Duchesne J.-C. The short duration and anorogenic character of anorthosite magmatism: U-Pb dating of the Rogaland complex, Norway // *Earth Planet. Sci. Lett. Elsevier*. 1996. V. 139. P. 335–350.
28. Sharkov E.V., Chistyakov A.V., Smol'kin V.F., Belyatskii V.B., Fedotov Zh.A. Age of the Moncha Tundra fault, Kola Peninsula: Evidence from the Sm-Nd and Rb-Sr isotopic systematics of metamorphic assemblages // *Geochem. Int.* 2006. V. 44. P. 317–326 <https://doi.org/10.1134/S001670290604001X>.
29. Smith W.D., Maier W.D., 2021. The geotectonic setting, age and mineral deposit inventory of global layered intrusions. *Earth Sci Rev* 220, 103736. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103736>.
30. Stacey J.S. and Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1975. V. 26. No 2. P. 207–221.
31. Steiger R.H. and Jäger E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1977. V. 36. No 3. P. 359–362.
32. Tanaka T., Togashi S., Kamioka H., Amakawa H., Kagami H., Hamamoto T., Yuhara M., Orihashi Y., Yoneda S., Shimizu H., Kunimaru T., Takahashi K., Yanagi T., Nakano T., Fujimaki H., Shinjo R., Asahara Y., Tanimizu M., Dragusanu C. JNdi-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium // *Chemical Geology*. 2000. V. 168. P. 279–281. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00198-4).
33. Zozulya D.R., Bayanova T.B., Eby G.N. Geology and Age of the Late Archean Keivy Alkaline Province, Northeastern Baltic Shield. *J Geol.* 2005. V. 113. P. 601–608. <https://doi.org/10.1086/431912>.