

УДК 552.321.2: 551.73 (571.54)

Sm–Nd-ВОЗРАСТ СВЯТОНОСИТОВ ПОЛУОСТРОВА СВЯТОЙ НОС (ВОСТОЧНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

© 2024 г. В. И. Левицкий^{1,*}, В. П. Ковач², член-корреспондент РАН А. Б. Котов²,
Л. З. Резницкий³, И. В. Левицкий¹, Н. Ю. Загорная²

Поступило 06.05.2024 г.

После переработки 27.05.2024 г.

Принято к публикации 29.05.2024 г.

Святоноситы – сиениты с андрадитовым гранатом, редкий тип магматических пород, описанных П. Эсколя в 1913 г. на полуострове Святой Нос (оз. Байкал). Ввиду отсутствия в породах циркона, позволяющего надёжно датировать U–Pb-методом возраст пород, были проведены геохронологические исследования Sm–Nd-методом по валовому составу и минералам. В результате были получены 2 предполагаемых периода становления святоноситов. По валовому составу и четырём минералам (гранат, пироксен, калиевый полевой шпат, апатит) возраст составил 262 ± 21 млн лет (СКВО = 1.6), а по валовому составу и гранату – 274 ± 25 млн лет (СКВО = 0.0). Полученные результаты совпадают с рубежами проявления тектоно-метаморфических и магматических процессов, связанных с формированием Восточно-Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского (Монголо-Охотского) складчатого пояса. Святоноситы в комплексах подвижных (складчатых) поясов в обрамлении Сибирского кратона являются индикаторными породами, отражающими проявление мантийно-корового взаимодействия.

Ключевые слова: Байкал, святоноситы, Sm–Nd-возраст, 262–274 млн лет

DOI: 10.31857/S2686739724100051

ВВЕДЕНИЕ

Святоноситы (андрадитовые сиениты) были открыты на Байкальском п-ове Святой Нос П. Эсколя [1] во время его работы в 1913 году составе Радиевой экспедиции, руководимой В.И. Вернадским, и названы по месту обнаружения. Интерес П. Эсколя к этим породам был обусловлен вопросом, почему темноцветный минерал в магматических породах гранитного ряда представлен андрадитом, который обычно присущ известковым низкотемпературным скарнам. По прошествии 100 лет после открытия святоноситов в мире обнаружено порядка 50 мест их нахождения. Байкальский регион является крупнейшей провинцией, включающей

не менее 17 массивов с присутствием святоноситов. Но наиболее крупными и самыми известными остаются проявления святоноситов на п-ове Святой Нос, включающие открытые П. Эсколя Эскольский [1] и А.Я. Жидковым – Марковский массивы [2] (рис. 1). Здесь обнаруживается весь спектр разновидностей святоноситов и сопряжённых с ними андрадитсодержащих скарнов или метасоматитов, которые в тех или иных сочетаниях встречаются в других проявлениях Восточной Сибири.

ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВЯТОНОСИТОВ

Условия залегания, петрография и геохимия святоноситов полуострова рассматривались ранее ([2–4] и др.). Отметим, что в массивах святоноситов залегают совместно с безгранатовыми сиенитами, образуя отдельные изолированные тела, часто граничащие с метаморфитами святоносской серии. В контактах святоноситов с мраморами развиты гранат-пироксеновые

¹Институт геохимии Сибирского отделения
Российской Академии наук, Иркутск, Россия

²Институт геологии и геохронологии докембрия
Российской Академии наук, Санкт-Петербург, Россия

³Институт Земной коры Сибирского отделения
Российской Академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: vlevit@igc.irk.ru

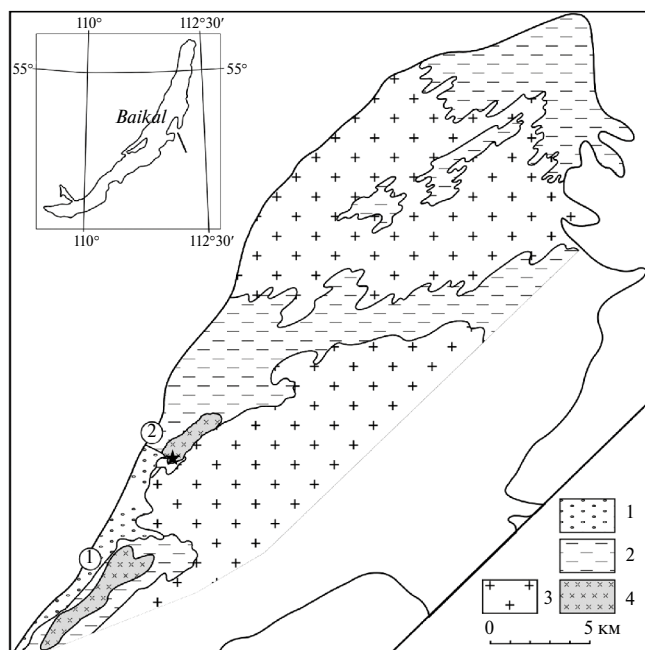


Рис. 1. Схематизированная геологическая карта п-ова Святой Нос (показан стрелкой на врезке), по [3]. 1 — четвертичные отложения; 2 — метаморфические породы святоносской серии; 3 — гранитоиды, нерасчленённые по составу и возрасту; 4 — проявления святоноситов (1 — Эскольский массив, 2 — Марковский массив). Звездочкой показано место отбора пробы СН-57.

и пироксеновые скарны с переходами соответственно к святоноситам или сиенитам. Скарны также присутствуют среди гнейсов и сланцев, образуя небольшие тела разнообразной формы и в виде включений в святоноситах и сиенитах.

По структурно-текстурным особенностям и геологическим соотношениям среди андрадит-содержащих пород п-ова Святой Нос выделяются: 1 — гранат-пироксеновые скарны; 2 — порфировидные пироксеновые святоноситы с реликтами ранних скарнов; 3 — порфировидные пироксеновые святоноситы с гломеропорфировыми обособлениями и включениями угловатых блоков скарнов; 4 — массивные пироксеновые святоноситы без включений скарнов; 5 — аплитовидные пироксеновые или амфиболовые святоноситы. Между перечисленными выше разновидностями наблюдаются сложные соотношения, но в целом ряд от гранат-пироксеновых скарнов к аплитовидным святоноситам отражает пространственно-временную последовательность формирования пород и увеличение степени замещения скарнов, что указывает на их формирование в результате единого процесса петрогенезиса. Породы, относимые к 1–2 группе

связаны постепенными переходами и формировались преимущественно метасоматическим путём, а святоноситы 3–5 групп между собой и породами 1–2 групп имеют резкие интрузивные контакты, что указывает на их формирование при участии магматических расплавов. Именно присутствие угловатых включений меланократовых андрадит-пироксеновых скарнов, как впервые отметил ещё П. Эсколя [1], свидетельствует о принадлежности святоноситов к магматическим породам, а многочисленные прожилки магматических пород во включениях скарнов позволяют отнести последние к редко наблюдаемым в природе, известковым скарнам магматической стадии. Порфировидные святоноситы с включениями скарнов и массивные без включений являются пара- и автохтонными фациями, а аплитовидные святоноситы — аллохтонными.

Тектурно-структурные особенности и минеральный состав святоноситов и скарнов сильно варьируют. В целом от ранних пород к поздним, отмечается уменьшение содержаний граната и пироксена и увеличение калиевого полевого шпата и плагиоклаза. Типичные скарны содержат более 70% темноцветных минералов, а святоноситы, напротив, — до 70% лейкократовых.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения возраста использована проба СН-57, представляющая наиболее распространённый в Эскольском и Марковском массивах тип святоноситов — пироксеновые, с массивной текстурой, порфировидной с гломеропорфировыми выделениями структурой и угловатыми включениями пироксен-гранатовых скарнов. Святоноситы и сиениты, ассоциирующие с ними, являются более молодыми образованиями, чем гранитоиды чивыркуйского комплекса, доминирующего на п-ове Святой Нос. Хотя содержания Zr в святоноситах достигает 1000 г/т, циркон в протоочках проб нами не обнаружен. Весь цирконий изоморфно входит в силикаты, особенно в гранат, что исключает наиболее надежное датирование U-Pb-методом по циркону. Из других методов достаточно приемлемым, благодаря присутствию граната, является самарий-неодимовый.

Этот тип резко доминирует среди святоноситов, сечёт более ранние автохтонные сиениты и, в свою очередь, пересекается жилами аплитовидных амфиболовых святоноситов, т.е. относится к параавтохтонным образованиям. Святоносит

Таблица 1. Содержания петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в святоносите (проба СН-57)

SiO ₂	57.29	U	0.5	V	110
TiO ₂	1.10	Th	3.5	Ni	7.6
Al ₂ O ₃	15.40	Li	11	Co	11
Fe ₂ O ₃	4.26	Rb	52	Sc	4.6
FeO	2.38	Ba	6200	La	150
MnO	0.17	Sr	6300	Ce	300
MgO	1.28	Nb	2.5	Pr	29
CaO	8.10	Y	35	Nd	130
Na ₂ O	4.37	Zr	260	Sm	21
K ₂ O	4.07	Be	1.7	Eu	4.3
P ₂ O ₅	0.45	Cu	4	Gd	22
п.п.п.	0.40	Zn	42	Er	4.6
F	0.11	Pb	24	Yb	3.7
Сумма	99.38	Cr	10	Lu	0.35

сложен микроклин-мезопертитом и олигоклазом (в сумме до 80%), клинопироксеном (8–9%) и андрадитом (5–8%), образующими совместные скопления, и титанитом (1–2%). Акцессорные минералы представлены апатитом, ортитом и магнетитом, вторичные (поздне- или постмагматические) минералы – амфиболом (0.5–1) и эпидотом (1–3%). В шлифах циркон не встречен. Химический состав святоносита приведён в таблице 1.

Выделение мономинеральных фракций проводилось путём ручной отборки концентратов, последующего дробления до фракции – 0.1–0.15 мм и очистки магнитной сепарацией и в тяжёлых жидкостях. Чистота монофракций проверялась в иммерсионных препаратах и для граната, пироксена составляла не ниже 99.5%, полевого шпата 98–99%.

Определения содержаний и изотопных составов Sm и Nd выполнены в ИГГД РАН. Перед разложением монофракции минералов, кроме граната, обрабатывались в особо чистом ацетоне, а затем в 1-нормальном (1N) HCl. Для удаления возможных включений монацита монофракция растёртого граната подвергалась кислотному выщелачиванию в 1N HCl при температуре около 90°C в течение одного часа, а затем в разбавленной HF при комнатной температуре. Навески в 100 мг растёртых в пудру образцов, к которым был добавлен смешанный изотопный индикатор

¹⁴⁹Sm–¹⁵⁰Nd, разлагались в тefлоновых бюксах в смеси HCl+HF+HN₃ при температуре 110°C. Полнота разложения проверялась под биноклем. Редкоземельные элементы были выделены посредством стандартной катионообменной хроматографии на колонках смолы BioRad AG1-X8 200– 400 меш, а Sm и Nd – с помощью экстракционной хроматографии на колонках LN-Spec (100–150 меш) фирмы “Eichrom”. Изотопные составы Sm и Nd были определены на многоколлекторном масс-спектрометре “Finnigan” MAT-261 в статическом режиме. Измеренные отношения ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd нормализованы к отношению ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 и приведены к отношению ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511860 в Nd стандарте La Jolla. Точность определения концентраций Sm и Nd составила ±0.5%, изотопных отношений ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd – ±0.5%, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd – ±0.005%. Средневзвешенное значение ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в Nd стандарте La Jolla по результатам четырёх измерений отвечает 0.511849±8. Уровень холостого опыта за время исследований составлял 0.03–0.2 нг для Sm и 0.1–0.5 нг для Nd. При расчёте величин ε_{Nd}(t) использованы современные значения для однородного хондритового резервуара по [5]. Для расчёта параметров изохрон использовались программа ISOPLOT [6]. Погрешности приведены для 95%-ного доверительного интервала. Результаты измерений и расчётов приведены в таблице 2 и на рисунке 2а, б.

Таблица 2. Sm–Nd-изотопные данные для святоносита (проба СН-57)

Обр.	Sm, мкг/г	Nd, мкг/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 2\sigma$ изм.)	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{Nd}}(\text{DM})$, млн лет
Порода (WR)	25.7	157.4	0.0987	0.512219 ± 5	–4.8	1238
Пироксен (Cpx)	1.83	9.04	0.1223	0.512299 ± 10	–4.0	
Апатит (Ap)	140.4	649	0.1307	0.512294 ± 6	–4.4	
Полевой шпат (Fsp)	0.33	1.80	0.1097	0.512261 ± 8	–4.3	
Гранат (Grt)	87.3	164.3	0.3211	0.512617 ± 3	–4.8	

Примечание. Величина $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ рассчитана на возраст 274 млн лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ Sm–Nd ИЗОТОПНЫХ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИНЕРАЛОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассчитано два варианта изохроны: 1) по валовому составу и четырём минералам; 2) по валовому составу и гранату. Для первого варианта (рис. 2 а) получен возраст 262 ± 21 млн лет ($\text{СКВО} = 1.6$), для второго (рис. 2 б) – 274 ± 25 ($\text{СКВО} = 0.0$). В пределах ошибки эксперимента полученные оценки возраста совпадают и однозначно свидетельствуют о позднепалеозойском возрасте святоноситов. Значения $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ в святоносите и минералах в нем, гранитах Чивыркуйского комплекса [11] отражают значительную роль метаосадочных пород при их становлении. Предполагалось формирование андрадит-пироксеновых скарнов за счёт кальцитовых мраморов [4]. При этом святоносит и его минералы характеризуются близкими отрицательными величинами $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ – соответственно –4.8 (табл. 2) и гранитов чивыркуйского комплекса –3.2 – –7.2 [11], отражая в обоих случаях влияние метаосадочных протолитов в близких по возрасту образованиях.

В Восточно-Забайкальском сегменте Центрально-Азиатского складчатого пояса в период с верхнего палеозоя по средний мезозой проявились интенсивные тектоно-метаморфические и магматические процессы, связанные с закрытием Монголо-Охотского океана и формированием одноимённого складчатого пояса. Представления о динамике проявления которых детально рассмотрены в работе [7] и ряде других. Крупномасштабное магнеобразование контролировалось кинетическими особенностями субдуцирующей под Сибирский континент Монголо-Охотской океанической коры [8]. Погружение стагнирующего слэба в верхнюю мантию

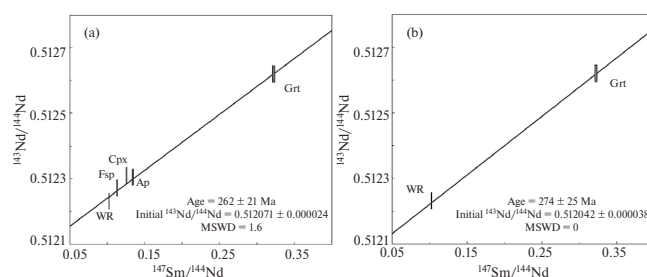


Рис. 2. Sm–Nd-изохроны для святоносита СН-57.

(а) по четырём минералам и породе в целом;
(б) по гранату и породе в целом. Условные обозначения в таблице 2.

в конечном счёте приводило к проникновению мантийных магматических расплавов в нижнюю кору. При этом наряду с деструкцией стагнирующего слэба признаётся контроль магматической активности мантийным плюмом [9–11]. В связи с этим имеет место достаточно значимое развитие в Западном Забайкалье магматических пород со щелочным “уклоном”. Среди последних заметное место занимают интрузивы возрастного диапозона, совпадающего с возрастом, установленным для святоноситов – 260–280 млн лет, или, с учётом погрешностей, несколько более широкого [7, 11]. Однозначным является более позднее образование святоноситов относительно пород гранитоидов Чивыркуйского комплекса.

Геохимическая специфика святоноситов характерна для щелочных магматических пород и близких образований (карбонатиты, кимберлиты), имеющих мантийные источники: аномально высокие концентрации TiO_2 , P_2O_5 , Ba, Sr, TR при низких Rb и Pb [2, 4, 12]. Предполагается, что формирование святоноситов в этом и других комплексах обрамления Сибирского кратона [12, 13], происходило при взаимодействии мантийных флюидов или магм мантийной природы

с обогащённым кальцием коровым протолитом. Это проявилось в образовании метасоматически-магматогенных серий от меланократовых метасоматитов (in situ) до лейкократовых автохтонных и аллохтонных магматических святоносителей. В целом, святоносители можно рассматривать как наиболее значимый и объективный индикатор мантийно-корового взаимодействия, которое может фиксироваться непосредственно в обнажениях уже по их присутствию.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Геохронологические исследования выполнены в лаборатории изотопной геологии ИГГД РАН при финансовой поддержке государственной темы НИР FMUW-2022-0003. Петролого-минералого-геохимические исследования проведены с использованием оборудования ЦКП “Изотопно-геохимических исследований” ИГХ СО РАН в рамках выполнения государственного задания по Проекту IX.129.1.3. (№ 0350-2016-0029).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Eskola P.* On the igneous Rocks of Sviatoy Noss in Transbaikalia // *Overs. Finska Vetensk. Soc. Forhandl.* 1921. Bd. LXIII, avd A. № 1. 100 p.
2. *Петрова З. И., Жидков А. Я., Левицкий В. И. и др.* Святоносители п-ва Святой Нос (Байкал) // *Известия АН СССР. Сер. Геол.* 1981. № 3. С. 26–40.
3. *Литвиновский Б. А., Занвилевич А. Н., Ащепков И. В.* О природе байкальских святоносителей // *Известия АН СССР. Сер. геол.* 1986. № 2. С. 31–44.
4. *Левицкий В. И., Петрова В. И.* Эволюция вещества при формировании святоносителей // *Геохимия.* 1982. № 10. С. 1525–1530.
5. *Jacobsen S. B., Wasserhurg G. J.* Sm-Nd Evolution of Chondrites and Achondrites // *Earth and Planetary Science Letters.* 1984. 67. P. 137–150.
6. *Ludwig K. R.* Isoplot for MS-DOS, version 2.5 // *U.S. Geol. Survey Open-File Rept.* 88–557. 1991. 64 p.
7. *Цыганков А. А., Бурмакина Г. Н., Хубанов В. Б., Буянтуева М. Д.* Геодинамика позднепалеозойского батолитообразования в Западном Забайкалье // *Петрология.* 2017. Т. 25. № 4. С. 395–418.
8. *Мазукабзов А. М., Донская Т. В., Гладкочуб Д. П., Падерин И. П.* Геодинамика Западно-Забайкальского Сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса в позднем палеозое // *Геология и геофизика.* 2010. Т. 51. № 5. С. 615–628.
9. *Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Mazukabzov A. M., Ivanov A. V.* Late Paleozoic – Mesozoic subduction-related magmatism at the southern margin of the Siberian continent and the 150 million-year history of the Mongol-Okhotsk Ocean // *Journ. Asian Earth Sci.* 2013. V. 62. P. 79–97.
10. *Kuzmin M. I., Yarmolyuk V. V., Kravchinsky V. A.* Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // *Earth-Science Reviews.* 2010. V. 102. P. 29–59.
11. *Цыганков А. А.* Позднепалеозойские гранитоиды Западного Забайкалья: последовательность формирования, источники магм, геодинамика // *Геология и геофизика,* 2014. Т. 55. № 2. С. 197–227.
12. *Плюснин Г. С., Левицкий В. И., Пахольченко Ю. А., Кузнецова С. В.* Rb-Sr-возраст и генезис сиенитов Быстринского массива в Юго-Западном Прибайкалье // *Доклады АН СССР.* 1991. Т. 316. № 2. С. 440–443.
13. *Левицкий В. И., Резницкий Л. З., Котов А. Б., Ковач В. П., Сальникова Е. Б., Макагон В. М., Конев А. А., Сандимирова Г. П.* Возраст формирования и изотопные характеристики святоносителей Байкальской провинции / Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма (Материалы Всероссийской конференции “Изотопное датирование” – III. 6–8 июня. Москва). М.: ИГЕМ, 2006. С. 153–158.

Sm-Nd AGE OF THE SVIATONOSSITES OF THE SVIATOI NOSE PENINSULA (EASTERN BAIKAL REGION)

**V. I. Levitskiy^{a, #}, V. P. Kovach^b, Corresponding Member of the RAS A. B. Kotov^b,
L. Z. Reznitskiy^c, I. V. Levitskiy^a, N. Y. Zagornaya^b**

^a*Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

^b*Institute of Geology and Geochronology of the Precambrian,
Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation*

^c*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: vlevit@igc.irk.ru*

Sviatonossites are syenites with andradite garnet, a rare type of igneous rocks described by P. Eskol in 1913 on the Sviatoy Nose peninsula (Lake Baikal). Due to the absence of zircon in the rocks, which makes it possible to date the age of rocks using a reliable U-Pb method, geochronological studies of Sm and Nd by the gross composition and minerals were carried out. As a result, 2 estimated periods of the formation of the Saints were obtained. According to the gross composition and four minerals (garnet, pyroxene, potassium feldspar, apatite), the age was 262 ± 21 million years (SQUAW = 1.6), and according to the gross composition and garnet – 274 ± 25 million years (SQUAW = 0.0). The results obtained coincide with the boundaries of the manifestation of tectonic-metamorphic and magmatic processes associated with the formation of the East Trans-Baikal segment of the Central Asian (Mongol-Okhotsk) folded belt. Sviatonossites in complexes of mobile (folded) belts framed by the Siberian craton are indicator rocks reflecting the manifestation of mantle-crustal interaction.

Keywords: Baikal sviatonossites, Sm-Nd age, 262–274 million years