

УДК 552.3+550.4

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ И Sr–Nd-ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА ПОЗДНЕПЕРМСКО–РАННЕТРИАСОВЫХ ТРАППОВ КУЗНЕЦКОГО БАССЕЙНА: ИСТОЧНИКИ МАГМ И КОРРЕЛЯЦИЯ С ВУЛКАНИТАМИ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА

© 2023 г. Т. В. Светлицкая^{1,*}

Представлено академиком РАН Н.П. Похиленко 19.10.2022 г.

Поступило 19.10.2022 г.

После доработки 08.02.2023 г.

Принято к публикации 13.02.2023 г.

Приведены результаты геохимических и Rb–Sr- и Sm–Nd-изотопных исследований пермо–триасовых вулканитов (базальты, андезибазальты) и силлов (трахидолериты, монцодиориты) Кузнецкого бассейна – одного из регионов Сибирской крупной изверженной провинции. Показано, что вулканический разрез Кузнецкого бассейна состоит из нижней (лавы покрова I и II: $TiO_2 = 1.6–1.9$ мас. %, $Gd/Yb = 2.0–2.1$) и верхней (лавы покровов III–VIII: $TiO_2 = 1.4–1.8$ мас. %, $Gd/Yb = 1.7–1.9$) серий. Породы Майзасского силла геохимически коррелируются с андезибазальтами II покрова нижней серии, а породы Сыркашевского силла – с вулканитами верхней серии. Траппы Кузнецкого бассейна сформировались в результате частичного плавления Sr–Nd-изотопно-гетерогенной субдукционно-модифицированной литосферной мантии. Они геохимически схожи с низко-Ti базальтами нижней–средней подсветы надеждинской свиты Норильского района, однако отличаются от них по Sr–Nd-изотопному составу. Изотопные Sr–Nd-характеристики неконтаминированных лав и пород Сыркашевского силла ($\epsilon Nd(T) = (+4.6)–(+2.4)$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_T = 0.7047–0.7054$) являются унаследованными от древней литосферной мантии и не отражают вклад Сибирского плюма. Породы Майзасского силла ($\epsilon Nd(T) = (+2.2)–(+2.1)$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_T = 0.7055–0.7063$) сформировались из мантийного расплава, испытавшего контаминацию коровым карбонатным материалом.

Ключевые слова: Sr–Nd-изотопная система, редкие и рассеянные элементы, лавы, силлы, Кузнецкий бассейн, Сибирская крупная изверженная провинция

DOI: 10.31857/S2686739722602277, EDN: UJDWKI

ВВЕДЕНИЕ

Сибирская крупная изверженная провинция (Сибирская КИП) является крупнейшей провинцией континентального траппового магматизма и содержит уникальные по запасам ЭПГ–Cu–Ni-месторождения Норильского района. Она охватывает площадь около 3 млн км², включая регионы Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты, Таймыра, Кузнецкого бассейна, а также часть бассейнов Карского моря и моря Лаптевых [1]. Высокоточные оценки возраста магматических пород показывают, что основной этап эффузивной и интрузивной активности пришелся на границу перми и триаса (~251–252 млн лет) и длился около 1 млн лет [2]. Хотя различные “не-

плюмовые” модели были предложены для объяснения столь масштабного кратковременного магматизма, происхождение Сибирской КИП в результате плюмомовой активности на сегодняшний день остается наиболее общепринятой точкой зрения [3].

Выяснение петрогенезиса магматических пород разных регионов Сибирской КИП и корреляция их изотопно-геохимических характеристик имеют фундаментальное значение для понимания эволюции траппового магматизма и уточнения моделей его формирования. В представленной работе мы обсуждаем геохимические и первые Sm–Nd- и Rb–Sr-изотопные данные для траппов (лав из разных покровов и монцодиоритов из силлов) Кузнецкого бассейна – одного из регионов Сибирской КИП, расположенного в складчатом обрамлении платформы [1, 3, 4]. Предыдущими исследованиями на основании анализа петролого-геохимических характеристик пород было показано, что вулканиты центральной части Кузнецкого

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: svt@igm.nsc.ru

бассейна сформировались в результате низких степеней плавления (<5%) субдукционно-модифицированной литосферной мантии под воздействием астеносферных флюидов/расплавов и могут быть рассмотрены как более эволюционировавшие аналоги базальтов надеждинской свиты Норильского района [3]. В то же время установленные петрогенетических особенностей формирования Кузнецких траппов и их полноценная корреляция с вулканитами центральной части Сибирской КИП в настоящее время существенно затруднены из-за слабой изученности силлов юго-восточной части бассейна, а также из-за крайне ограниченных изотопно-геохимических данных для этих пород. Единственное на сегодняшний день исследование, в котором приводятся результаты Sm–Nd-изотопного изучения базальтоидов Кузбасской впадины, указывает значения $\epsilon Nd(T)$ в диапазоне от +2.3 до +3.1 [4]. Полученные в данном исследовании геохимические и Sr–Nd-изотопные данные существенно расширяют основу для реконструкции мантийных источников родоначальных расплавов Кузнецких траппов и процессов мантийно–корового взаимодействия, а также для изотопно-геохимической корреляции с вулканическими свитами Норильского района центральной части Сибирской КИП.

ПЕРМО-ТРИАСОВЫЙ ТРАППОВЫЙ МАГМАТИЗМ КУЗНЕЦКОГО БАССЕЙНА

Кузнецкий бассейн расположен в 300 км к югу от Западно-Сибирской плиты, в северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области (рис. 1 а) и представляет собой позднепалеозойскую (поздний карбон–пермь) депрессию, наложенную на додевонские аккреционные комплексы [3]. Магматические породы Кузнецкого бассейна принадлежат к позднепермско–раннетриасовому абинскому комплексу, объединившему ранее выделяемые в регионе салтымаковский и сыркашевский комплексы (рис. 1 б). В центральной части бассейна абинский комплекс представлен лавовыми покровами в составе вулканогенно-осадочной абинской серии, охватывающими площадь около 3000 км² под Бунгарапской впадиной при кумулятивной мощности вулканитов до 300 м [3]. Абинская серия состоит из вулканогенно-терригенных отложений мальцевской, сосновской и яминской свит и включает один базальтовый и шесть андезибазальтовых покровов в объеме мальцевской свиты и два андезибазальтовых покрова в объеме яминской свиты (рис. 1 в). В юго-восточной части бассейна абинский комплекс представлен силлами и дайками мощностью от нескольких метров до нескольких сотен метров, при протяженности до десятков километров (рис. 1 б). Наиболее крупными из них являются

Сыркашевский и Майзасский силлы. Сыркашевский силл дифференцирован от трахидолеритов до монцогаббро и кварцевых монцодиоритов и залегает среди раннепермских терригенных угленосных толщ. Майзасский силл сложен трахидолеритами, монцодиоритами и кварцевыми монцодиоритами и интрузирует средне-верхнекарбонные карбонатно-терригенные угленосные отложения.

Имеющиеся ⁴⁰Ar–³⁹Ar-возраста для андезибазальтов мальцевской свиты и монцогаббро Сыркашевского силла (~252 млн лет [1, 3]) показывают, что магматические породы Кузнецкого бассейна сопоставимы по возрасту с Сибирскими траппами. Наиболее полный вулканический разрез Сибирской КИП представлен в Норильском районе [1, 3, 5–7]. Формирование траппов начинается с излияния высоко-Ti щелочных/субщелочных вулканитов нижней серии ($TiO_2 > 2$ мас. %; $Gd/Yb \geq 2$) (ивакинская, сыверминская и гудчихинская свиты), которые интерпретируются как производные низкой степени плавления глубинного (предположительно, гранат-пироксенитового) мантийного источника. Вверх по разрезу они сменяются низко-Ti толеитовыми вулканитами средней (хаканчанская, туклонская, надеждинская свиты) и верхней (моронговская, мокулаевская, хараелахская, кумгинская, самоедская свиты) серий ($TiO_2 < 2$ мас. %; $Gd/Yb < 2$). Их формирование связывают с интенсивным плавлением менее глубинного мантийного источника, сопоставимого с субдукционно-модифицированной литосферной мантией [5–7].

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ

Образцы магматических пород для изучения Sr–Nd-изотопного состава были отобраны из природных обнажений в центральной и юго-восточной частях Кузнецкого бассейна (рис. 1 б, в). Образцы вулканитов были отобраны из обнажений по р. Томь и представлены базальтом N-85 (покров I) и андезибазальтами N-84 (покров II), N-81 (покров III) и N-62 (покров IV) из мальцевской свиты и андезибазальтом N-56 (покров VIII) из яминской свиты. Базальт N-85 сложен вкрапленниками оливина и плагиоклаза (40 об. %), погруженными в основную массу из плагиоклаза, оливина, клинопироксена и вулканического стекла. Андезибазальты N-84, N-81, N-62 и N-56 состоят из вкрапленников оливина, клинопироксена и плагиоклаза (2–15%) и основной массы, сложенной вулканическим стеклом, плагиоклазом, оливином и клинопироксеном. Расположение мест отробывания и описание пород, а также содержания в них петрогенных окислов, редких и рассеянных элементов приведены в работе [3]. Интрузивные породы были отобраны из Сыркашевского силла (образцы Sr-01 и Sr-02) на правом

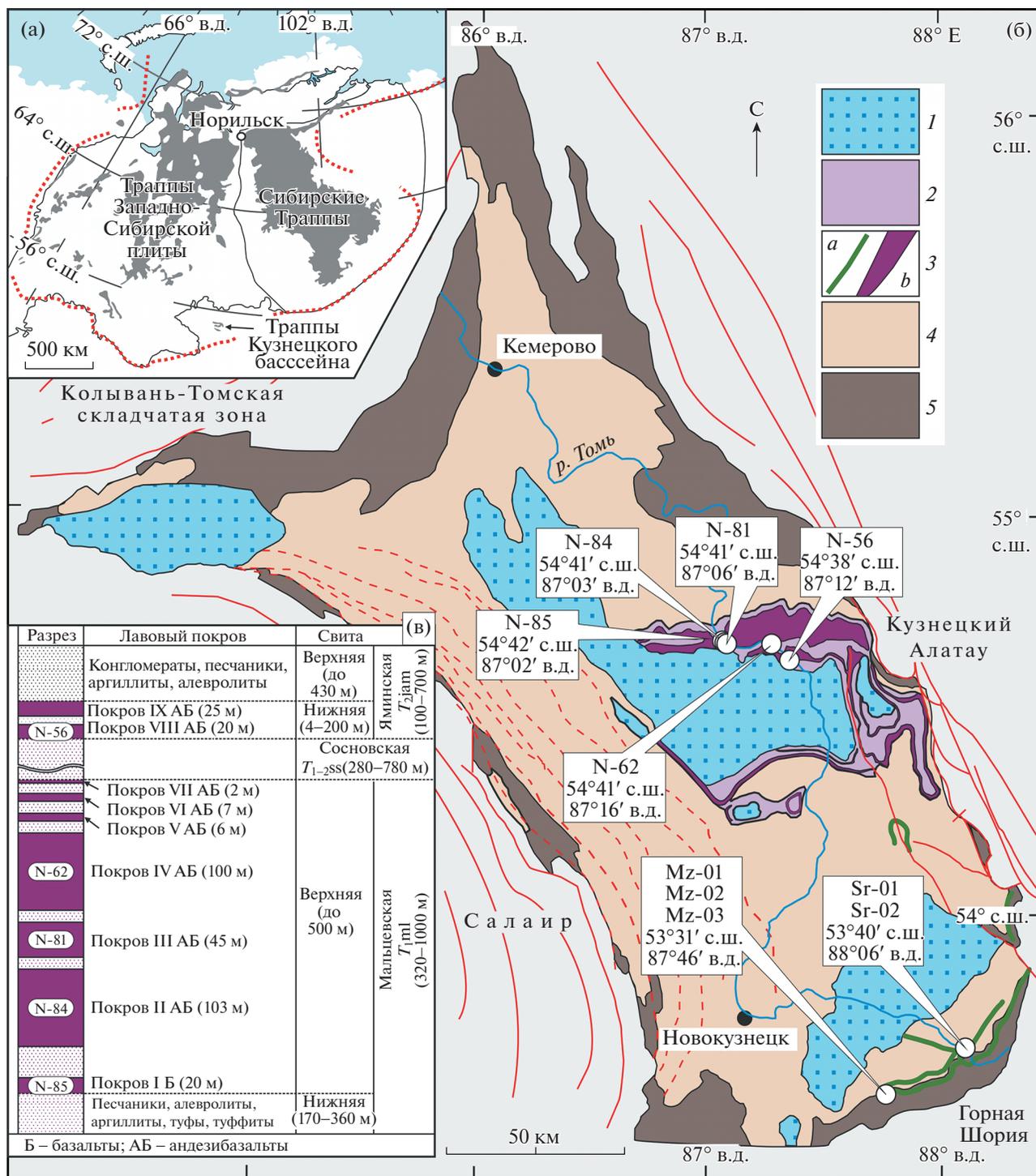


Рис. 1. (а) Положение траппов Кузнецкого бассейна в составе Сибирской крупной изверженной провинции (граница Сибирской крупной изверженной провинции дана по [1]). (б) Упрощенная геологическая карта Кузнецкого бассейна [3], с местами и координатами отбора проб для геохимических и Sr–Nd-изотопных исследований (образцы N-85, N-84, N-81, N-62 и N-56 из лавовых покровов; образцы Sr-01 и Sr-02 из Сыркашевского силла; образцы Mz-01, Mz-02 и Mz-03 из Майзасского силла). 1 – ниже–среднеюрские угленосно–терригенные отложения; 2 – ниже–среднетриасовые терригенно–вулканогенные отложения; 3 – позднепермско–раннетриасовые силлы / дайки (а) и лавы (б); 4 – пермские угленосно–терригенные отложения; 5 – каменноугольные карбонатно–терригенные и угленосные и средне–верхнедевонские терригенные отложения. (в) Положение лавовых покровов в обобщенном стратиграфическом разрезе абинской серии Кузнецкого бассейна [3], с привязкой изученных образцов вулканитов. Следует отметить, что отложения мальцевской, сосновской и яминской свит в региональной легенде относятся к триасовому возрасту, тогда как возраст вулканитов определяется как позднепермско–раннетриасовый [1, 3].

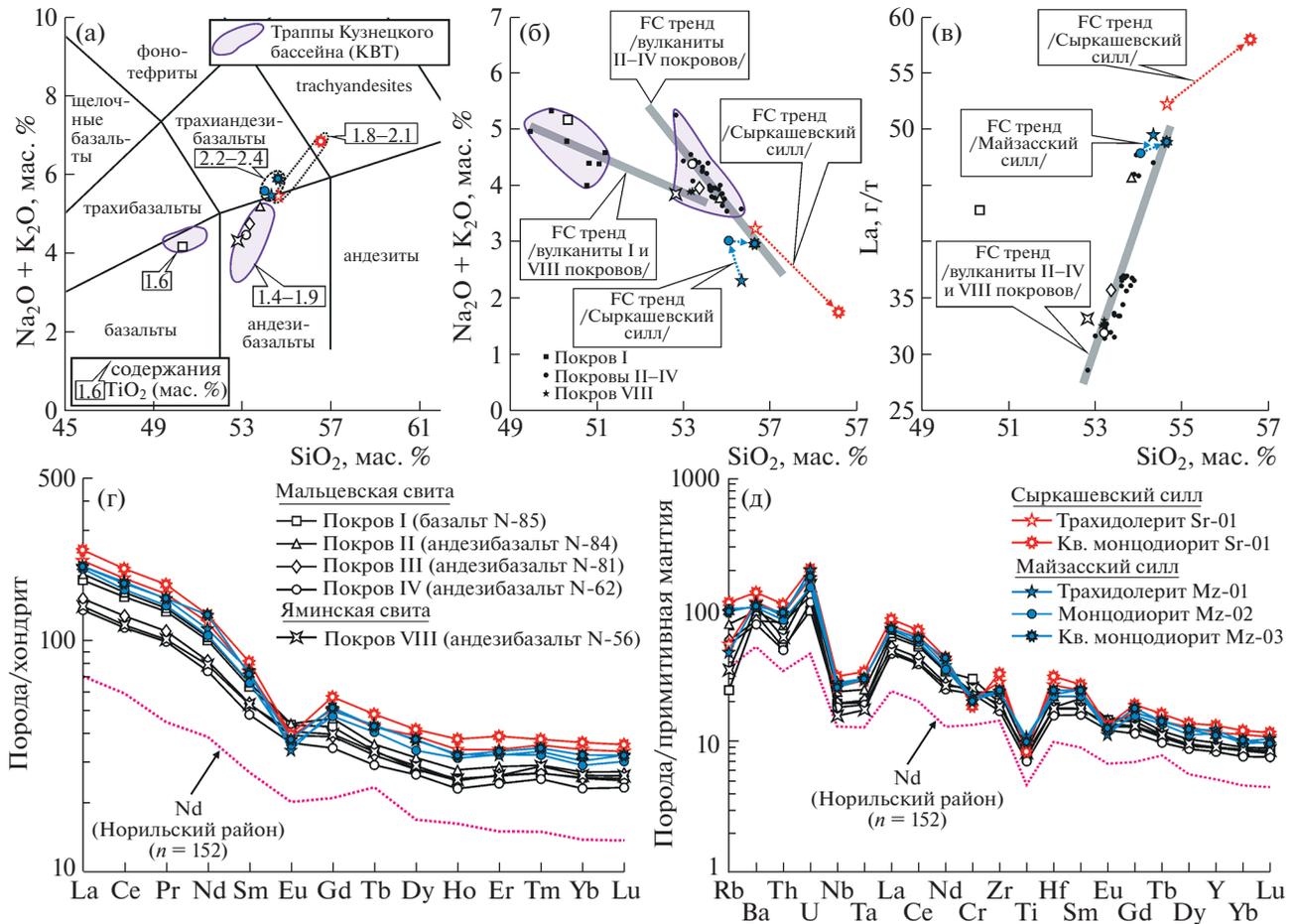


Рис. 2. Петролого-геохимические характеристики траппов Кузнецкого бассейна. На диаграммах SiO₂–Na₂O + K₂O (а), SiO₂–MgO (б) и SiO₂–La (в) составы вулканитов и пород Сыркашевского силла следуют трендам фракционной кристаллизации (FC-тренд), тогда как породы Майзасского силла показывают ковариации, сопоставимые с процессами ассимиляции и фракционной кристаллизации (AFC-тренд). Композиционные поля для траппов Кузнецкого бассейна (КВТ) составлены по [3]. (г–д). Распределения редкоземельных элементов нормированы на состав хондрита (г) и спайдерграммы редких и рассеянных элементов нормированы на состав примитивной мантии (д) для изучаемых вулканитов и пород силлов. Содержания редких и рассеянных элементов для базальтов надеждинской свиты Норильского района (Nd) из [3], n – количество анализов. Состав хондрита и примитивной мантии по [9].

берегу р. Томь, у пос. Карай, и Майзасского силла (образцы Mz-01, Mz-02 и Mz-03) на левом берегу р. Мрассу, в 6 км к югу от пос. Камешек (рис. 1 б). Трахидолерит Sr-01 из закалочной части Сыркашевского силла сложен вкрапленниками плагиоклаза и клинопироксена (5%) и основной массы, состоящей из плагиоклаза, клинопироксена, биотита и вулканического стекла. Кварцевый монцодиорит Sr-02 из центральной части силла сложен оливином (5%), клинопироксеном (13%), амфиболом (5%), биотитом (2%), плагиоклазом (50%), калиевым полевым шпатом (15%) и кварцем (10%). Трахидолерит Mz-01 из закалочной части Майзасского силла состоит из фенокристов плагиоклаза (30%) и клинопироксена (ед. зерна) и вулканического стекла (70%). Монцодиорит Mz-02 из центральной части силла сложен оливином (3%), клинопироксеном (15%), амфиболом

(5%), биотитом (2%), плагиоклазом (52%), калиевым полевым шпатом (20%) и кварцем (3%). Минеральный состав кварцевого монцодиорита Mz-03 из центральной части силла: клинопироксен (10%), амфибол (5%), биотит (10%), плагиоклаз (45%), калиевый полевой шпат (20%) и кварц (10%). Среди аксессуарных минералов монцодиоритов Сыркашевского и Майзасского силлов отмечаются апатит, ильменит и редкие сульфиды. Монцодиориты представлены мелко-среднезернистыми массивными породами с монцитонитовой и графической структурами, трахидолериты характеризуются порфировой структурой, с мелко-скрытозернистой основной массой.

Химический состав образцов пород из силлов определялся в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Содержания породообразующих окислов определя-

лись методом силикатного рентгенофлуоресцентного анализа с помощью рентгеновского спектрометра ARL-9900-XP фирмы “Thermo Electron Corporation”. Содержания редких и рассеянных элементов определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на ИСП масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT фирмы “Finnigan Mat” (Germany). Результаты приведены в табл. 1. Определение изотопного состава Sr и Nd проводилось в 10 валовых пробах в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург). Определение содержаний Rb, Sr, Sm и Nd в навесках производилось с применением метода изотопного разбавления. Анализ Rb–Sr- и Sm–Nd-изотопных систем проводился на магнитосекторных мультиколлекторных масс-спектрометрах с двойной фокусировкой с помощью методов ICP-MS (“Neptune Plus”) (Sm, Nd) и TIMS (“Triton Plus”) (Sr, Rb). Результаты представлены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Траппы Кузнецкого бассейна представлены низко-Ti вулканитами (преимущественно, андезибазальтами, при подчиненном количестве базальтов) и силлами, дифференцированными от умеренно-щелочных трахидолеритов до кварцевых монцодиоритов. Породы Сыркашевского и Майзасского силлов близки по содержанию породообразующих окислов, редких и рассеянных элементов (табл. 1), однако различаются по характеру их распределения. Для Сыркашевского силла, от трахидолеритов до монцогаббро и кварцевых монцодиоритов содержания SiO_2 , K_2O , редких и рассеянных элементов возрастают, а концентрации Fe_2O_3 , MgO , CaO и общей магнезиальности (Mg-no) снижаются (рис. 2 а–в). Такой стиль распределения главных и рассеянных элементов сопоставим с процессами FC (фракционной кристаллизации) магматического расплава. Для Майзасского силла смена пород от трахидолеритов до кварцевых монцодиоритов не находит контрастного отражения в распределении редких и рассеянных элементов и сопровождается слабым ростом содержаний SiO_2 , MgO , CaO , K_2O и Mg-no при снижении концентрации Fe_2O_3 (рис. 2 а–в). Подобное распределение сопоставимо с процессами AFC (ассимиляция + фракционная кристаллизация) и предполагает, что породы Майзасского силла могли кристаллизоваться из магматического расплава, контаминированного карбонатным материалом. Источником этого материала могли служить карбонатно-терригенные отложения, вмещающие силл.

Трахидолериты Сыркашевского и Майзасского силлов характеризуются повышенными содержаниями SiO_2 (54.3–54.7 мас. %), TiO_2 (2.1–2.4 мас. %)

и щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \sim 5.5$ мас. %) при более низких содержаниях MgO (2.3–3.2 мас. %) и сопоставимых концентрациях Fe_2O_3 (12.5–13.1 мас. %) по сравнению с базальтами и андезибазальтами, слагающими лавовые покровы центральной части Кузнецкого бассейна (50.3–54.3 мас. % SiO_2 , 3.5–5.2 мас. % MgO , 11.7–14.4 мас. % Fe_2O_3 , 1.4–1.9 мас. % TiO_2 , 3.3–5.2 мас. % $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (табл. 1) [3]. Породы силлов обогащены крупноионными литофильными (Ba, Rb), легкими редкоземельными (La–Sm) ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 6.5\text{--}7.1$) и радиоактивными (U, Th) элементами и показывают выраженные отрицательные Ta–Nb- и Ti-аномалии (рис. 2 г, д). Характер распределения редких и рассеянных элементов в них идентичен лавам, при этом абсолютные концентрации элементов более высокие, за исключением Sr и Eu; более низкие содержания этих элементов, вероятно, связаны с более интенсивным фракционированием плагиоклаза.

Анализ ранее опубликованных [3, 4] и новых данных по петролого-геохимическому составу пород позволяет выделить в вулканическом разрезе Кузнецкого бассейна нижнюю и верхнюю серии. Нижняя серия включает базальты покрова I и андезибазальты покрова II с повышенными содержаниями TiO_2 ($\text{TiO}_2 = 1.6\text{--}1.9$ мас. % при Mg-no = 36–44) и отношениями $\text{Gd}/\text{Yb} \geq 2$ (2.0–2.1). Верхняя серия сложена андезибазальтами III–VIII покровов с более низкими содержаниями TiO_2 ($\text{TiO}_2 = 1.4\text{--}1.8$ мас. % при Mg-no = 35–43) и отношениями $\text{Gd}/\text{Yb} < 2$ (1.7–1.9). Строгий контроль Gd/Yb -отношений позволяет предположить, что разделение на серии может быть обусловлено различиями в степени частичного плавления магм разных серий. Породы Майзасского силла геохимически коррелируются с андезибазальтами II покрова нижней серии Кузнецкого разреза ($\text{TiO}_2 = 2.2\text{--}2.4$ мас. % при Mg-no = 26–32, $\text{Gd}/\text{Yb} = 2.0\text{--}2.1$), а породы Сыркашевского силла – с вулканитами верхней серии ($\text{TiO}_2 = 1.8\text{--}2.1$ мас. % при Mg-no = 23–34, $\text{Gd}/\text{Yb} = 1.8\text{--}1.9$).

Сходство в содержании и распределении редких и рассеянных элементов в вулканитах и силлах (рис. 2, 3) позволяет предположить единый мантийный источник для их родоначальных расплавов. В соответствии с ранее проведенными исследованиями [3] и новыми данными (рис. 1, 2, 3) этот мантийный источник сопоставим с субдукционно-модифицированной литосферной мантией, плавление которой было спровоцировано давлением астеносферных флюидов/расплавов с ОИВ-характеристиками. Более низкая магнезиальность трахидолеритов (Mg-no = 26–34) при более высоких содержаниях TiO_2 указывает на то, что силлы кристаллизовались из расплавов, более эволюционировавших в результате дифференциации и фракционной кристаллизации в глубин-

Таблица 1. Содержания породообразующих окислов (мас. %) и редких и рассеянных элементов (г/т) в силлах Кузнецкого бассейна

Порода	Сыркашевский силл		Майзасский силл		
	Трахидолерит	Кварцевый монцодиорит	Трахидолерит	Монцодиорит	Кварцевый монцодиорит
Номер образца	Sr-01	Sr-05	Mz-01	Mz-02	Mz-03
SiO ₂	53.33	55.46	51.67	52.65	53.43
TiO ₂	2.03	1.80	2.32	2.22	2.13
Al ₂ O ₃	14.25	14.54	14.69	14.20	14.28
Fe ₂ O ₃	12.23	11.28	12.45	12.87	12.30
MnO	0.22	0.21	0.14	0.22	0.20
MgO	3.16	1.71	2.20	2.93	2.89
CaO	6.04	5.53	4.87	5.82	5.74
Na ₂ O	3.63	3.51	3.83	3.07	3.23
K ₂ O	1.68	3.18	1.36	2.35	2.52
P ₂ O ₅	0.83	0.60	0.86	0.80	0.82
BaO	0.10	0.11	0.10	0.10	0.09
SO ₃	0.05	0.06	0.57	0.17	0.12
V ₂ O ₅	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
ППП	2.28	1.62	4.89	2.28	1.72
Сумма	99.86	99.64	99.98	99.71	99.50
Mg-no	33.83	23.10	25.91	31.11	31.78
Rb	34.66	71.60	30.06	64.53	61.28
Sr	444.75	386.16	463.04	421.64	423.42
Y	53.11	59.66	55.31	51.73	50.00
Zr	314.07	365.58	266.93	261.25	271.34
Nb	18.44	22.02	19.90	18.45	18.16
Cs	1.76	3.48	1.22	4.23	3.07
Ba	801.87	940.64	781.04	722.83	739.89
La	52.26	57.95	49.50	47.84	48.84
Ce	112.62	123.53	108.48	100.16	106.24
Pr	14.23	15.57	13.55	12.66	13.40
Nd	54.54	58.49	50.95	47.81	57.85
Sm	10.82	11.91	10.96	9.79	10.76
Eu	2.18	2.21	1.88	1.96	2.10
Gd	9.96	11.25	9.83	9.29	10.54
Tb	1.53	1.73	1.56	1.45	1.52
Dy	9.46	10.04	9.05	8.11	9.04
Ho	1.90	2.10	1.82	1.73	1.86
Er	5.40	6.14	5.11	5.11	5.25
Tm	0.85	0.90	0.80	0.77	0.79
Yb	5.54	5.91	4.94	4.70	5.00
Lu	0.80	0.85	0.77	0.72	0.71
Hf	8.27	9.55	7.01	6.75	7.51
Ta	1.20	1.38	1.22	1.22	1.21
Th	7.83	9.31	7.65	6.99	8.06
U	3.65	4.28	4.18	3.14	3.72

Примечание. ППП – потери при прокаливании. Mg-no = $100 \times \text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO})$ (в мол. %) – магнезиальность.

Таблица 2. Rb–Sr- и Sm–Nd-изотопные характеристики траппов Кузнецкого бассейна

Номер образца	Порода	Rb (г/г)	Sr (г/г)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr (изм.)	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _T	Sm (г/г)	Nd (г/г)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (изм.)	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _T	εNd(T)	T _{Nd} (DM) (млн лет)
<i>Покров I (мальцевская свита)</i>													
N-85	Базальт	16.27	624.60	0.07535	0.70498	0.70471	9.47	48.79	0.11729	0.51269	0.51250	+3.6	–
<i>Покров II (мальцевская свита)</i>													
N-84	Андезибазальт	53.45	494.67	0.31259	0.70625	0.70514	9.81	49.74	0.11928	0.51265	0.51246	+2.7	806
<i>Покров III (мальцевская свита)</i>													
N-81	Андезибазальт	41.17	499.73	0.23831	0.70599	0.70514	8.07	39.66	0.12297	0.51268	0.51248	+3.2	794
<i>Покров IV (мальцевская свита)</i>													
N-62	Андезибазальт	36.64	489.69	0.21644	0.70600	0.70523	7.42	35.94	0.12485	0.51268	0.51247	+3.1	811
<i>Покров VIII (яминская свита)</i>													
N-56	Андезибазальт	21.97	525.54	0.12093	0.70517	0.70474	7.79	37.01	0.12717	0.51276	0.51255	+4.6	693
<i>Сыркашевский силл</i>													
Sr-01	Трахидолерит	36.85	445.74	0.23913	0.70627	0.70542	11.37	57.79	0.11899	0.51265	0.51245	+2.6	815
Sr-05	Кварцевый монцодиорит	76.49	394.98	0.56030	0.70738	0.70539	12.24	62.06	0.11926	0.51264	0.51244	+2.4	832
<i>Майзасский силл</i>													
Mz-01	Трахидолерит	65.60	418.23	0.45380	0.70722	0.70561	10.55	52.81	0.12071	0.51262	0.51242	+2.1	871
Mz-02	Монцодиорит	71.21	433.02	0.47575	0.70719	0.70550	10.70	53.84	0.12009	0.51263	0.51243	+2.2	857
Mz-03	Кварцевый монцодиорит	28.89	453.72	0.18419	0.70692	0.70627	11.62	58.37	0.12030	0.51263	0.51243	+2.2	859

Примечание. Значения (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_T, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_T и εNd(T) пересчитаны на возраст 250 млн лет. Для оценки правильности и воспроизводимости результатов измерений изотопного отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в природных образцах использовался международный стандарт NIST SRM987. За период работы среднее измеренное значение отношений ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в NIST SRM987 составило 0.710256 ± 16 (2σ, N = 8). Ошибка внутри опыта не превышала 0.000015 (2σ). Правильность и воспроизводимость Sm–Nd-измерений контролировалась по результатам анализа стандарта горной породы BHVO-2 (USGS, США); средние значения для отношений ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd и ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в стандарте за время работы составили 0.127173 ± 0.000012 (2σ) и 0.512758 ± ± 0.000009 (2σ) соответственно. Измеренные отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr и ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd корректировались путем нормирования с использованием экспоненциального закона по опорным отношениям ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr = 8.3752 и ¹⁴⁸Nd/¹⁴⁴Nd = 0.24157 соответственно. Модельные возраста T_{Nd}(DM) рассчитаны для резервуара деплетированной мантии с (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)₀ = 0.513151 и ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0.21365 [8].

ных/малоглубинных магматических камерах по сравнению с таковыми для базальтов и андезибазальтов (Mg-по = 35–47).

Сопоставление с вулканическими свитами Норильского района показывает, что по своим геохимическим характеристиками Кузнецкие лавы и силлы коррелируются с низко-Ti вулканитами нижней–средней подсвиты надеждинской свиты (рис. 2 г, д, 3). Эта корреляция предположительно отражает относительно малоглубинный мантийный источник магм обоих регионов – субдукционно-модифицированную литосферную мантию. Некоторое сходство вулканитов I–II покровов Кузнецкого бассейна и пород Майзасского силла с высоко-Ti вулканитам ивакинской и сыверминской свит по Gd/Yb–La/Sm-систематике

(рис. 3 в), вероятно, отражает близкие степени частичного плавления их мантийных источников.

Лавы и силлы Кузнецкого бассейна характеризуются положительными значениями εNd(T) = (+2.1)–(+4.6), рассчитанными на возраст 250 млн лет, при отношениях (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_T = 0.70471–0.70627 (табл. 2; рис. 4 а). Изотопные Sr–Nd-составы базальтов и андезибазальтов (εNd(T) = (+4.6)–(+2.7), (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_T = 0.70471–0.70523) и пород Сыркашевского силла (εNd(T) = (+2.4)–(+2.6), (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_T = 0.70539–0.70542) располагаются вдоль мантийного тренда и характеризуются отрицательной корреляцией между значениями εNd(T) и (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_T (коэф. корреляции R = (–0.91) при значимом значении R (0.99) =

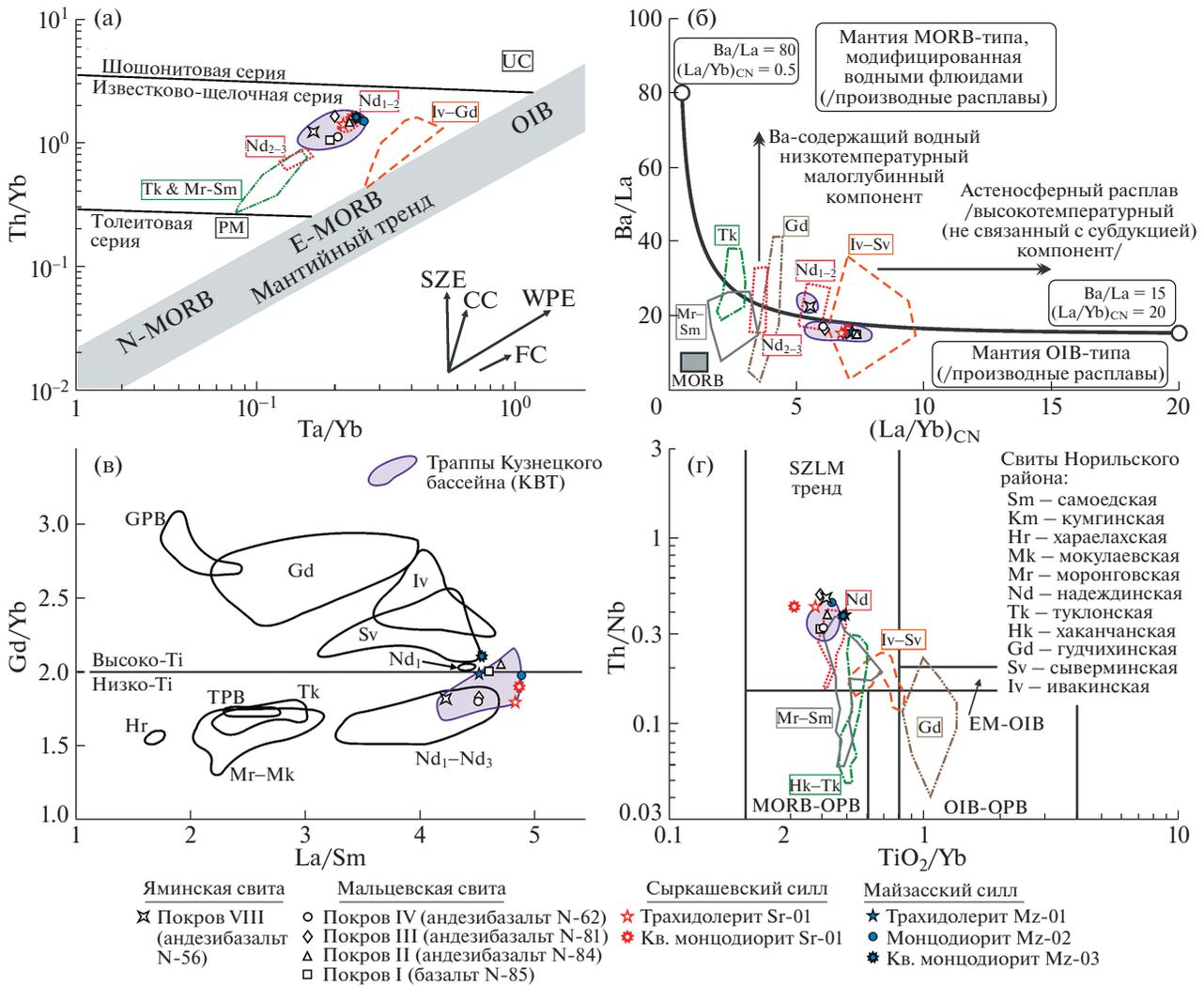


Рис. 3. (а) Диаграмма Th/Yb – Nb/Yb для траппов Кузнецкого бассейна (по [10]), иллюстрирующая доминирующую роль субдукционно-модифицированной литосферной мантии в качестве источника родоначальных расплавов. SZE – вектор обогащения субдукционным компонентом; CC – вектор коровой контаминации; WPE – вектор обогащения внутриплитным (плюмовым) компонентом; FC – вектор фракционной кристаллизации. На диаграмме Ba/La – $(La/Yb)_{CN}$ (б) (по [11, 12]), составы Кузнецких траппов располагаются вдоль линии смешения субдукционно-модифицированной литосферной мантии и астеносферной компоненты, указывая на потенциальное участие мантийного плюма в генерации расплавов. Состав хондрита для расчета $(La/Yb)_{CN}$ отношений по [9]. Композиционные поля Сибирских траппов Норильского района составлены на основе [5, 6, 7]. (в–г) Составы изучаемых вулканитов и силлов на диаграммах La/Sm – Gd/Yb (по [6]) (в) и Th/Nb – TiO_2/Yb (по [13]) (г) для вулканических свит Норильского района. Композиционные поля для траппов Кузнецкого бассейна (КБТ) составлены по [3].

= 0.80) (рис. 2 б). Мантийная последовательность, которой следуют составы Кузнецких траппов, предполагает, что изученные породы образовались из неконтаминированных коровым материалом мантийных расплавов или из мантийных расплавов с очень низкой степенью коровой контаминации, не отразившейся на изотопном составе пород. Этот вывод поддерживает предположение о низкой степени коровой контаминации магм, родоначальных для вулканитов Кузнецкого бассейна, полученное предыдущими исследованиями на основании анализа геохимических данных

[3]. Породы Майзасского силла характеризуются однородным, но менее радиогенным изотопным Nd-составом ($\epsilon Nd(T) = (+2.1)–(+2.2)$) и повышенными $(^{87}Sr/^{86}Sr)_T$ -значениями ($(^{87}Sr/^{86}Sr)_T = 0.70550–0.70627$) (рис. 4 а, б). Трахидолерит Mz-01 и монцодиорит Mz-02 располагаются на линии мантийной последовательности Кузнецких траппов, тогда как кварцевый монцодиорит Mz-03 смещен в сторону более радиогенного состава Sr (рис. 4 а, б). Поскольку степень вторичных изменений пород очень низкая, подобные изотопные вариации могут быть интерпретирова-

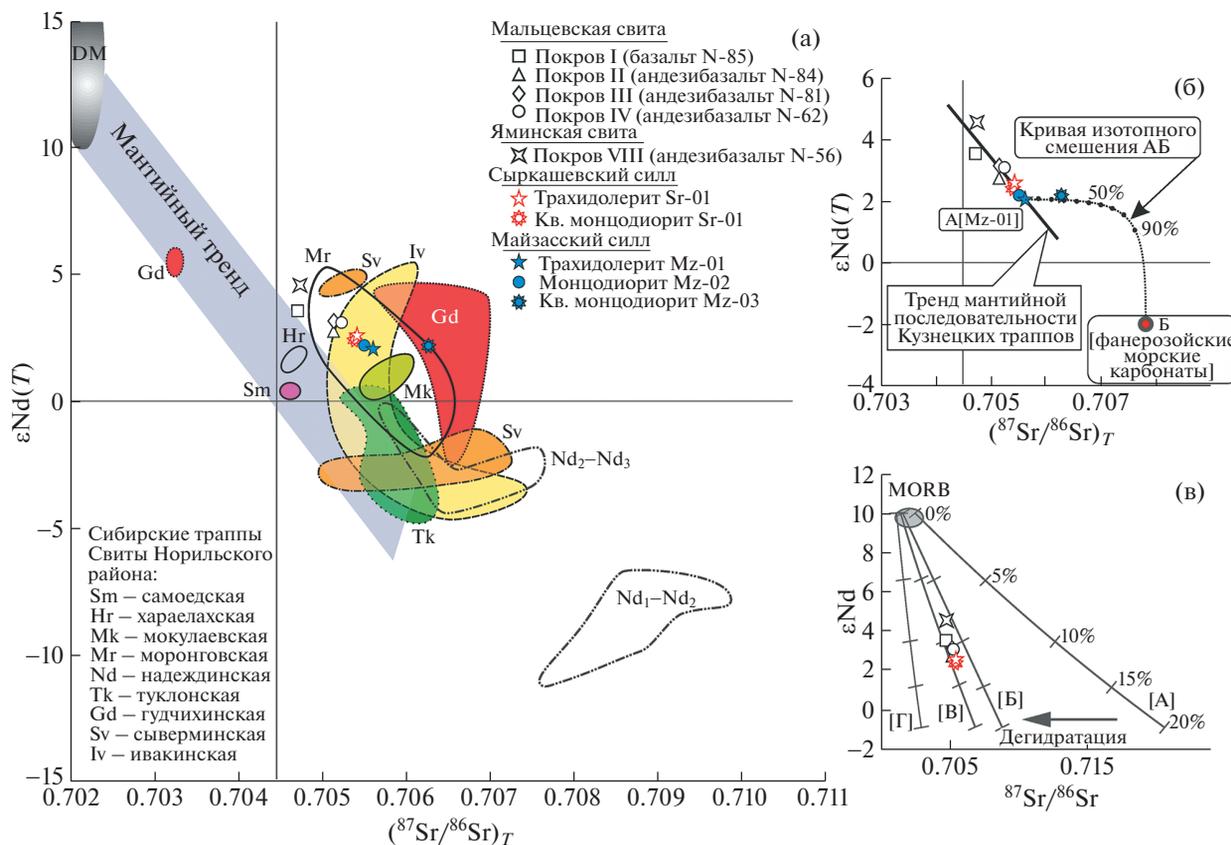


Рис. 4. (а) Sr–Nd-изотопные характеристики траппов Кузнецкого бассейна. Значения $\epsilon Nd(T)$ и $(^{87}Sr/^{86}Sr)_T$ рассчитаны на возраст $T = 250$ млн лет. DM – деплетированная мантия. Композиционные поля для Сибирских траппов Норильского района составлены по данным [6, 7, 14, 15]. В композиционном поле надежинской свиты (Nd) выделяются поля базальтов нижней и средней подсвиты (Nd_1 – Nd_2) и средней и верхней подсвиты (Nd_2 – Nd_3). Изотопные отношения $^{143}Nd/^{144}Nd$ и $^{87}Sr/^{86}Sr$ в вулканитах покровов и породах Сыркашевского силла показывают отрицательные ковариации, следуя тренду мантийной последовательности на $\epsilon Nd(T)$ – $(^{87}Sr/^{86}Sr)_T$ диаграмме (б). Состав кварцевого монцодиорита Mz-3 Майзасского силла располагаются на модельной кривой Sr–Nd-изотопного смешения АБ между трахидолеритом Mz-01 (компонент А), расположенном на линии мантийной последовательности Кузнецких траппов, и фанерозойскими морскими карбонатами (компонент Б) (состав по [16]). Модельная кривая построена с помощью параметрических уравнений из [17]. (в) Изотопные Sr–Nd-составы неконтаминированных траппов Кузнецкого бассейна на $\epsilon Nd(T)$ – $(^{87}Sr/^{86}Sr)$ диаграмме численного моделирования изотопного состава мантийного источника, сформировавшегося в результате смешения деплетированной MORB мантии с древним осадочным материалом (линия [А]) и последующей дегидратации [18]. Линии [Б], [В] и [Г] отображают изотопные составы мантийного источника при коэффициентах редукции 0,4, 0,3 и 0,1 соответственно.

ны как результат коровой контаминации мантийной магмы карбонатным материалом, что согласуется с AFC-механизмом эволюции Майзасского расплава. Результаты расчетного моделирования Sr–Nd-изотопного двухкомпонентного смешения предполагают, что Sr–Nd-изотопные характеристики кварцевого монцодиорита Майзасского силла (образец Mz-03) могут быть получены в результате смешения расплава с изотопным составом трахидолерита его краевой части (образец Mz-01) с 20–30% фанерозойских морских карбонатов (ФМК) (рис. 4 б). Такая высокая степень контаминации, однако, не поддерживается петрологическими данными (в частности, не наблюдается обогащение образца Mz-03 MgO и CaO).

Вероятно, вмещающие Майзасский силл карбонатно-терригенные отложения имели более радиогенный состав Sr по сравнению с усредненным $^{87}Sr/^{86}Sr$ -составом ФМК, и фактическая степень контаминации была ниже.

Положительные значения ϵNd (от +4.6 до +2.1) Кузнецких траппов предполагают умеренно деплетированный мантийный источник их родоначальных расплавов. Такой источник, однако, не согласуется с обогащением вулканитов и силлов некогерентными редкими элементами и высокими значениями $(La/Nb)_{PM} = 2.6$ – 3.2 , $(La/Sm)_{PM} = 2.7$ – 3.2 и $(Nb/Y)_{PM} = 1.7$ – 2.4 в породах, указывающими на плавление обогащенной мантии. Подобное противоречие между геохими-

ческим и Sr–Nd-изотопным составом свидетельствует о том, что обогащение мантийного источника Кузнецких траппов произошло непосредственно перед плавлением и не отразилось на его изотопном составе. Таким образом, полученные Sr–Nd-изотопные характеристики траппов Кузнецкого бассейна являются унаследованными от древней литосферной мантии, а наблюдаемые $\epsilon\text{Nd}(T)$ –($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_T-ковариации, по-видимому, отражают первичную мантийную гетерогенность. Исходя из рассчитанных значений модельных возрастов андезибазальтов и монцонитов ($T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 0.69\text{--}0.87$ млрд лет) (табл. 2), изотопные Sr–Nd-характеристики литосферной мантии под Кузнецким бассейном могли быть связаны с неопротерозойским событием. Сходные умеренно деплетированные Nd-изотопные составы ($\epsilon\text{Nd}(T) = (+3)\text{--}(+6)$) с аналогичным диапазоном модельных возрастов ($T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 0.7\text{--}0.9$ млрд лет) прослеживаются в породах палеозойских габбро-сиенитовых и гранитоидных комплексов Кузнецкого Алатау начиная с кембрия, а также фиксируются в девонских субщелочных базальтоидах сопредельного с Кузнецким Алатау Минусинского прогиба [19], отражая особенности состава литосферной мантии в региональном масштабе. Изотопный Sr–Nd-состав разновозрастных магматических ассоциаций Кузнецкого Алатау предыдущими исследованиями интерпретируется в контексте взаимодействия мантийного плюма типа PREMA или PREMA/FOZO, NIMU + EM и надсубдукционной литосферной мантии, с широко проявленными последующими процессами коровой контаминации мантийных выплавов [19]. Принимая во внимание, что лавы Кузнецкого бассейна произошли из расплавов, сформированных в результате низкой степени частичного плавления литосферной мантии при ограниченном участии астеносферной компоненты ($\text{Nb}/\text{La} \sim 0.3$ при $\text{La}/\text{Yb} \sim 10.2$), и не испытали значимую коровую контаминацию, их изотопные составы могут быть наиболее близки к изотопным характеристикам литосферной мантии Кузнецкого региона. Результаты численного моделирования показывают, что Sr–Nd-составы неконтаминированных траппов Кузнецкого бассейна сопоставимы с таковыми для мантийного источника, сформировавшегося в результате смешения деплетированной MORB мантии (DM) с небольшим количеством (менее 10%) древнего осадочного материала и последующей умеренной дегидратации (с коэффициентом редукции для Rb/Sr между 0.30 и 0.35) (рис. 4 в). Таким образом, Sr–Nd-изотопные характеристики литосферной мантии в регионе, по-видимому, обусловлены деятельностью древнего плюма, среди мантийных источников которого устанавливаются деплетированная компонента DM-типа и обогащенные компоненты EM-типа. С учетом близких неопро-

терозойских Nd-модельных возрастов разновозрастных магматических ассоциаций в регионе [19], по времени это событие сопоставимо с началом распада суперконтинента Родиния (825–740 млн лет [20]).

Несмотря на то что траппы Кузнецкого бассейна геохимически коррелируются с вулканитами нижней–средней подсвиты надеждинской свиты Норильского района, они отличаются от них по Sr–Nd-составу (рис. 4 а). Базальты I покрова мальцевской свиты и андезибазальтов VIII яминской свиты характеризуются более примитивными $\epsilon\text{Nd}(T)$ - и ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_T-значениями, чем большая часть свит Норильского района. Изотопные составы Sr и Nd андезибазальтов II, III и IV покровов и пород Сыркашевского и Майзасского силлов сопоставимы с таковыми для неконтаминированных/слабоконттаминированных разновидностей вулканитов как высоко-Ti ивакинской, так и низко-Ti моронговской свит. Следует отметить, что из-за варьирующей степени коровой контаминации и разных пропорций литосферной и астеносферной компонент, вовлеченных в генерацию расплавов, для Сибирских траппов Норильского района в целом не наблюдается строгой закономерности в распределении Sr–Nd-изотопных характеристик между свитами высоко- и низко-Ti серий. Принимая во внимание, что изотопные Sr–Nd-характеристики Кузнецких траппов являются унаследованными от древней литосферной мантии и не отражают вклад Сибирского плюма, отсутствие Sr–Nd-изотопной корреляции между индивидуальными вулканическими свитами/покровами Норильского и Кузнецкого регионов вполне ожидаемо.

ВЫВОДЫ

Траппы Кузнецкого бассейна представлены низко-Ti вулканитами и силлами, дифференцированными от умеренно-щелочных трахидолеритов до кварцевых монцодиоритов, и геохимически коррелируются с низко-Ti базальтами нижней–средней подсвиты надеждинской свиты Норильского района. Они сформировались в результате частичного плавления Sr–Nd-изотопно-гетерогенной субдукционно-модифицированной литосферной мантии под воздействием астеносферных флюидов/расплавов. Изотопные Sr–Nd-характеристики Кузнецких траппов являются унаследованными от древней литосферной мантии и не отражают вклад Сибирского плюма.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор искренне благодарит А.В. Наставко за помощь в сборе образцов, а также Н.Н. Крука и анонимных рецензентов за ценные замечания в процессе подготовки рукописи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400237-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reichow M.K., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., Davies C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S., Medvedev A.Ya., Mitchell C., Puchkov V.N., Safonova I.Yu., Scott R.A., Saunders A.D. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 277. № 1–2. P. 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.030>
2. Burgess S.D., Bowring S.A. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction // *Sci. Adv.* 2015. V. 1. № 7. e1500470. <https://doi.org/10.1126/sciadv.15004>
3. Svetlitskaya T.V., Nevolko P.A. Late Permian–Early Triassic traps of the Kuznetsk Basin, Russia: Geochemistry and petrogenesis in respect to an extension of the Siberian Large Igneous Province // *Gondwana Res.* 2016. V. 39. P. 57–76. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.06.014>
4. Крук Н.Н., Плотников А.В., Владимиров А.Г., Кутюлин В.А. Геохимия и геодинамические условия формирования траппов Кузбасса // *ДАН.* 1999. Т. 369. № 6. С. 812–815.
5. Fedorenko V.A., Lightfoot P.C., Naldrett A.J., Czamanske G.K., Hawkesworth C.J., Wooden J.L., Ebel D.S. Petrogenesis of the flood-basalt sequence at Noril'sk, North Central Siberia // *Int. Geol. Rev.* 1996. V. 38. № 2. P. 99–135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>
6. Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Hergt J., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A., Doherty W. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1993. V. 114. P. 171–188. <https://doi.org/10.1007/BF00307754>
7. Wooden J.L., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Arndt N.T., Chauvel C., Bouse R.M., King B.-S.W., Knight R.J., Siems D.F. Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1993. V. 57. № 15. P. 3677–3704. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90149-Q](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90149-Q)
8. Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1988. V. 87. № 3. P. 249–265. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90013-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90013-1)
9. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geo L. Soc. Spe Publ.* 1989. V. 42. № 1. P. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
10. Pearce J.A. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins // *Continental basalts and mantle xenoliths.* Shiva, Nantwich. 1983. P. 230–249.
11. Lin P.N., Stern R.J., Bloomer S.H. Shoshonitic volcanism in the Northern Mariana Arc: 2. Large-ion lithophile and rare earth element abundances: Evidence for the source of incompatible element enrichments in intraoceanic arcs // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 4497–4514. <https://doi.org/10.1029/JB094iB04p04497>
12. Pearce J.A., Stern R.J., Bloomer S.H., Fryer P. Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: Implications for the nature and distribution of subduction components // *Geochim. Geophys. Geosy.* 2005. V. 6. № 719. Q07006. <https://doi.org/10.1029/2004GC000895>
13. Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record // *Lithos.* 2021. V. 392–393. 106068. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106068>
14. Sharma M., Basu A.R., Nesterenko G.V. Nd-Sr isotopes, petrochemistry, and origin of the Siberian flood basalts, USSR // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1991. V. 55. № 4. P. 1183–1192. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90177-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90177-7)
15. Sharma M., Basu A.R., Nesterenko G.V. Temporal Sr-, Nd- and Pb-isotopic variations in the Siberian flood basalts: Implications for the plume-source characteristics // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1992. V. 113. № 3. P. 365–381. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(92\)90139-m](https://doi.org/10.1016/0012-821x(92)90139-m)
16. Покровский Б.Г. Коровая контаминация мантийный магм по данным изотопной геохимии. М.: Наука, 2000. 228 с.
17. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
18. Hanyu T., Nakamura E. Constraints on HIMU and EM by Sr and Nd isotopes re-examined // *Earth. Planet. Sp.* 2000. V. 52. P. 61–70. <https://doi.org/10.1186/BF03351614>
19. Врублевский В.В., Котельников А.Д., Изох А.Э. Возраст, петрологические и геохимические условия формирования Когтахского габбро-монцитонитового комплекса Кузнецкого Алатау // *Геология и Геофизика.* 2018. Т. 59. № 7. С. 900–830. <https://doi.org/10.15372/GiG20180702>
20. Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovsky V. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis // *Precambrian Res.* 2008. V. 160. № 1–2. P. 179–210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>

**GEOCHEMICAL AND Sr-Nd ISOTOPE SYSTEMATICS
OF THE LATE PERMIAN–EARLY TRIASSIC TRAPS FROM THE KUZNETSK
BASIN: MAGMA SOURCES AND CORRELATION
WITH THE NORIL'SK REGION VOLCANICS**

T. V. Svetlitskaya^{a,#}

*^aV.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

[#]E-mail: svt@igm.nsc.ru

Presented by Academician of the RAS N.P. Pokhilenko

The study provides whole-rock geochemical and Rb-Sr and Sm-Nd isotope examinations of Permian-Triassic volcanics (basalts, basaltic andesites) and sills (trachydolerites, monzodiorites) from the Kuznetsk Basin, which is part of the Siberian Large Igneous Province. It is shown that the volcanic section of the Kuznetsk Basin consists of the Lower (I and II units: $\text{TiO}_2 = 1.6\text{--}1.9$ wt.%, $\text{Gd/Yb} = 2.0\text{--}2.1$) and Upper (III–VIII units: $\text{TiO}_2 = 1.4\text{--}1.8$ wt.%, $\text{Gd/Yb} = 1.7\text{--}1.9$) Sequences. The Mayzass sill is geochemically correlated with the Unit II basaltic andesite of the Lower Sequence, and the Syrkashev sill is geochemically akin to the Upper Sequence. The Kuznetsk traps originated from the partial melting of a Sr-Nd isotopically heterogeneous subduction-modified lithospheric mantle. They are geochemically comparable to low-Ti basalts of the low–middle Nadezhdinsky suite from the Noril'sk region, but differ in Sr-Nd isotope composition. The Sr-Nd isotope signatures of the uncontaminated lavas and Syrkashev sill rocks ($\epsilon\text{Nd(T)} = (+4.6)\text{--}(+2.4)$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_T = 0.7047\text{--}0.7054$) are inherited from the ancient lithospheric mantle and do not represent the contribution of the Siberian plume. The Mayzass sill rocks ($\epsilon\text{Nd(T)} = (+2.2)\text{--}(+2.1)$; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_T = 0.7055\text{--}0.7063$) are derived from a parental melt contaminated with crustal carbonates.

Keywords: Sr-Nd isotopes, trace elements, lavas, sills, Kuznetsk Basin, Siberian Large Igneous Province