



FRACTIONATION AND ASSIMILATION DURING THE FORMATION OF THE DEVONIAN ANTIDROMIC IGNEOUS SERIES OF THE SISIM AREA IN THE MINUSINSK TROUGH: GEOCHEMICAL AND Sr-Nd ISOTOPIC EVIDENCE

A.A. Vorontsov ✉

Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. In the Minusinsk trough, being the large fragment of the Devonian Altai-Sayan rift system, the antidromous series along with the homodromous volcanic series are widespread, sialic rocks with SiO_2 content over 65 wt. % being predominant. Abundance of high-silica rocks in these series implies an extensive involvement of crustal igneous sources. However, in contrast to the homodromic series, for which the fractionation of basaltic magmas to trachyte compositions and assimilation processes during the formation of rhyolites are reconstructed, the rocks of the antidromic series are poorly studied in terms of their geochemical and isotope characteristics, which makes it difficult to assess the mechanisms of their formation. This article reports geological, petrographic, geochemical and Sr-Nd isotope characteristics of the igneous series of the Sisim area of the Minusinsk trough, its Early Devonian age is reliably identified by previous researchers, e.g. U-Pb dating by zircon. The X-ray fluorescence and mass spectrometric analyses were used to estimate the material composition. This series is composed of moderately alkaline basalts, dolerites, basaltic trachyandesites, trachyandesites, trachytes, trachydacites, rhyodacites and rhyolites. The intermediate and sialic rocks occur in the lower part of the section, prevailing over mafic rocks. As SiO_2 increases in the rocks of the Sisim antidromous series, similarly to the rocks of the homodromous series, the contents of incoherent elements are dispersed, and there is a trend of decreasing ϵ_{Nd} and increasing ϵ_{Sr} values. This evidence points to a disruption in fractionation resulting from the appearance of anatectic melts, which are close in composition to the upper continental crust. Thus, regardless of the sequence of formation of mafic, intermediate, and sialic rocks and their volume ratios in the homodromous and antidromous series, a combination of fractional crystallization of basaltic magmas and their assimilation of silicate crustal substrates is reconstructed for them.

KEYWORDS: Devonian Altai-Sayan rift system; Minusinsk trough; antidromic igneous series; incompatible elements; Sr-Nd isotopic composition; fractionation; assimilation

FUNDING: The studies are performed as a part of a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on conducting research on theme 0284-2021-0006 "Ultrabasic-basic complexes of the Siberian craton and its folded framing: compositional evolution, geodynamic aspects and ore potential".

SHORT COMMUNICATION

Correspondence: Alexander A. Vorontsov, voront@igc.irk.ru

Received: May 17, 2022

Revised: June 23, 2022

Accepted: June 29, 2022

FOR CITATION: Vorontsov A.A., 2022. Fractionation and Assimilation during the Formation of the Devonian Antidromic Igneous Series of the Sisim Area in the Minusinsk Trough: Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0649. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0649

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ И АССИМИЛЯЦИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ДЕВОНСКОЙ АНТИДРОМНОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ СЕРИИ СИСИМСКОГО АРЕАЛА В МИНУСИНСКОМ ПРОГИБЕ: ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И Sr-Nd ИЗОТОПНЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА

А.А. Воронцов

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

АННОТАЦИЯ. В Минусинском прогибе, который является крупным фрагментом девонской Алтае-Саянской рифтовой системы, наряду с гомодромными вулканическими сериями широко распространены антидромные серии с преобладанием сиалических пород с содержанием SiO_2 более 65 мас. %. Преобладание высококремнистых силикатных пород в этих сериях подразумевает широкое участие коровых магматических источников. Однако в отличие от гомодромных серий, для которых реконструируется фракционирование базальтовых магм до составов трахитов и ассимиляционные процессы при образовании риолитов, породы антидромных серий в отношении их геохимических и изотопных характеристик изучены крайне слабо, что затрудняет оценку механизмов их формирования. В статье эта задача решается на основе геологических, петрографических, геохимических и Sr-Nd изотопных характеристик магматической серии Сисимского ареала Минусинского прогиба, раннедевонский возраст которой надежно установлен предшествующими исследователями (U-Pb датирование по циркону). Для оценки вещественного состава использованы рентгенофлуоресцентные и масс-спектрометрические методы анализа. Эта серия сложена умеренно щелочными базальтами, долеритами, базальтовыми трахиандезитами, трахиандезитами, трахитами, трахидацитами, риодацитами и риолитами. Промежуточные и сиалические породы сосредоточены в нижней части разреза и доминируют над базитами. По мере увеличения содержания SiO_2 в породах Сисимской антидромной серии, подобно породам гомодромных серий, наблюдается дисперсия содержаний некогерентных элементов, снижение величины ϵ_{Nd} и увеличение ϵ_{Sr} . Эти характеристики указывают на нарушение хода фракционирования в результате появления анатектических расплавов, которые близки по составу к верхней континентальной коре. Таким образом, вне зависимости от последовательности формирования базитов, промежуточных и сиалических пород и их объемных соотношений в гомодромных и антидромных сериях для них реконструируется комбинация фракционной кристаллизации базальтовых магм и ассимиляции ими коровых субстратов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: девонская Алтае-Саянская рифтовая система; Минусинский прогиб; антидромная магматическая серия; несовместимые элементы; Sr-Nd изотопный состав; фракционирование; ассимиляция

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки РФ на проведение НИР по теме № 0284-2021-0006 «Ультраосновные – основные комплексы Сибирского кратона и его складчатого обрамления: эволюция состава, геодинамические аспекты и рудный потенциал».

1. ВВЕДЕНИЕ

Минусинский прогиб охватывает территорию около 100 тыс. км² и является одной из крупнейших структур девонской Алтае-Саянской рифтовой системы Центрально-Азиатского складчатого пояса. Развитие прогиба связано с формированием девонских магматических пород [Luchitsky, 1960], которые группируются в ассоциации, названия которым предложены в зависимости либо от статистического характера распределения SiO_2 , либо от суммарной щелочности пород. Так, выделяются базальтовые, бимодальные, непрерывные, пикродолеритовые и щелочные ассоциации [Vorontsov et al., 2021], которые, исходя из их геохимических и изотопных характеристик, следует с уверенностью относить к магматическим сериям. В строении разрезов вулканических районов с широким диапазоном SiO_2 доминирует гомодромный тип, который определяется по последовательной смене снизу вверх базитов промежуточными и далее сиалическими породами.

Механизмы их образования включают фракционирование базальтовых магм до составов трахитов и ассимиляционные процессы при образовании риолитов [Vorontsov et al., 2015]. В то же время в прогибе распространены антидромные серии. Несмотря на меньший масштаб их распространения по сравнению с гомодромными сериями, приуроченность сиалических пород к основаниям разрезов подразумевает широкое участие коровых магматических источников уже на ранних этапах магмогенеза. Однако породы подобных серий остаются практически не изученными в веществе плане, что затрудняет оценку механизмов их образования.

В представленной статье приведены геологические, геохимические и изотопные (Sr, Nd) данные для пород антидромной магматической сисимской серии, а также рассмотрены вопросы ее происхождения с позиции оценок составов магматических источников и роли мантийно-корового взаимодействия.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Отбор образцов и штучных проб магматических пород Сисимской серии производился последовательно снизу вверх по разрезам вулканогенно-осадочных толщ. После петрографического описания были выбраны породы без признаков существенных постмагматических изменений для определения их элементного и Sr-Nd изотопного состава.

Определение главных и редких элементов, а также пробоподготовка для Sr-Nd изотопного анализа проводились в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск, Россия).

Главные элементы анализировали методом РФА на волнодисперсионном рентгеновском спектрометре Pioneer S4 (Bruker AXS, Германия) с рентгенооптической схемой Soller.

Измерения редких элементов выполнены методом ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT-2 Finnigan MAT с применением внутреннего стандарта Rh. Для калибровки расчетов элементного содержания применялись многоэлементные сертифицированные растворы CLMS-1, -2, -4, SPEX (США). Все образцы горных пород были приготовлены путем сплавления с метабора́том лития.

Изотопные измерения Sr и Nd выполнены в ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск, Россия) на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 с использованием активатора $Ta_2O_5 \cdot nH_2O$ в смеси кислот $Hf:HNO_3:H_3PO_4$ (1:1:1). Для контроля использован стандарт ВНИИМ-Sr. Значения ϵ_{Nd} и ϵ_{Sr} вычислялись относительно модельного хондритового резервуара CHUR с параметрами $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512638$; $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1967$; $^{87}Rb/^{86}Sr = 0.7045$; $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.0816$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Геологическая основа

Породы антидромной Сисимской серии участвуют в строении одноименного магматического ареала Минусинского прогиба Центрально-Азиатского складчатого пояса (рис. 1, а). Породы ареала обнажаются в береговых разрезах Красноярского водохранилища, несогласно налегают на додевонские геологические комплексы Восточного Саяна и перекрываются послезиветскими терригенными отложениями. Девонские вулканические породы в плане образуют подкову, выгнутую на восток, падение покровов происходит на северо-запад к центру впадины (рис. 1, б).

Магматические породы Сисимской серии вскрыты в разрезах по рекам Убей и Сисим, которые имеют двухчленное строение. Нижние части (1100–1500 м) разрезов представлены вулканопирокластической толщей, которая сложена лавами, туфами, туфоигнимбритами и эксплозивными брекчиями переслаивающихся трахидацитов, риодацитов, риолитов (рис. 1, в), трахитов

(рис. 1, г) и трахиандезитов. В верхних горизонтах этих частей разрезов появляются редкие покровы базальтовых трахиандезитов и базальтов.

Верхние части (800 м) разрезов представлены терригенно-осадочными отложениями нижнего и среднего девона, согласно перекрывающими вулканопирокластическую толщу. В разрезе по реке Сисим сосредоточены по меньшей мере четыре силла долеритов (рис. 1, д), мощность каждого из которых варьируется от 20 до 80 м.

С учетом отсутствия стратиграфических несогласий между вулканитами, пирокластикой и осадками и геологических свидетельств внедрения силлов в слаболицифицированные осадочные породы [Fedoseev, 2008] одновозрастность всех геологических комплексов сисимской серии не вызывает сомнений. Их возраст установлен U-Pb методом по циркону из трахириолитов и составил 407.5 ± 0.2 млн лет [Babin et al., 2004].

3.2. TAS классификация пород и петрография

Согласно классификационной TAS-диаграмме (рис. 2, а) составы пород сисимской серии (Прил. 1, табл. 1.1) варьируются в диапазоне 45–78 мас. % SiO_2 , в области пород умеренно щелочного ряда. Породы разделены на три группы в зависимости от содержания SiO_2 , мас. %: 1) базиты, $45.0 < SiO_2 < 52.5$; 2) промежуточные породы, $52.5 < SiO_2 < 65.0$; 3) сиалические породы, $65 < SiO_2 < 78$.

Базиты представлены умеренно щелочными базальтами и долеритами. Их минеральный состав определяют авгит, лабрадор (An_{50-65}) и оливин. Среди этих пород обнаруживаются нефелин-нормативные разновидности с содержанием нефелина по CIPW до 5.6 мас. %, однако модалный нефелин в них отсутствует.

Базальтовые трахиандезиты, трахиандезиты и трахиты отнесены к промежуточным породам, трахидациты, риодациты и риолиты – к сиалическим породам.

Базальтовые трахиандезиты и трахиандезиты близки между собой по минеральному составу. Породообразующие минералы представлены авгитом и зональным плагиоклазом (в ядре – An_{45-50} , по периферии – An_{35-45}), реже – щелочным полевым шпатом с пертитовым строением и хлоритизированными темноцветными минералами (амфибол, биотит). В трахитах уменьшается доля авгита, но увеличивается доля щелочного полевого шпата, который обладает пертитовым строением, и зонального плагиоклаза (в ядре – An_{25-30} , по периферии – An_{10-25}), редко встречается кварц. Трахидациты, риодациты и риолиты сложены щелочным полевым шпатом, кварцем и кислым плагиоклазом в различных пропорциях. Темноцветные минералы встречаются редко, подвержены постмагматическим изменениям и не диагностируются.

3.3. Редкие элементы в породах

Спектры распределения редких литофильных элементов в базитах сисимской серии имеют сложную конфигурацию, отвечающую характеристикам как OIB,

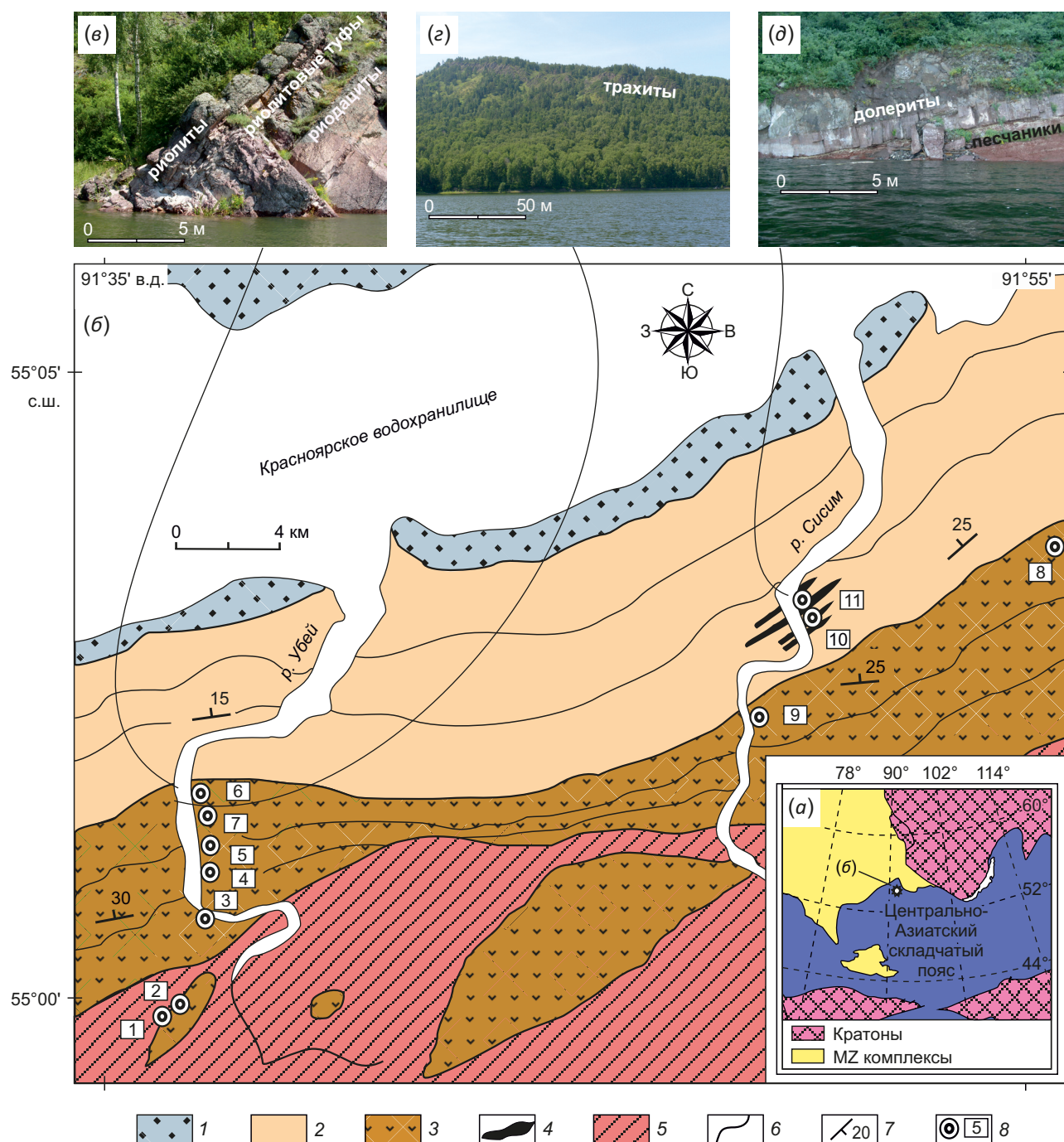


Рис. 1. Геологическая характеристика Сисимского магматического ареала Минусинского прогиба.

(а) – расположение Сисимского ареала в структурах Центрально-Азиатского складчатого пояса; (б) – схема геологического строения Сисимского ареала; (в) – риолитовые и риодацитовые потоки, которые разделены туфами; (г) – панорама трахитового покрова; (д) – нижний контакт долеритового силла с песчаниками.

1 – осадочные породы (C_1); 2 – осадочные породы (D); 3 – базальты, базальтовые трахиандезиты, трахиандезиты, трахиты, трахидациты, риодациты, риолиты сисимской серии; 4 – долеритовые силлы сисимской серии; 5 – додевонские нерасчлененные геологические комплексы; 6 – геологические границы; 7 – элементы залегания; 8 – точки отбора проб, номера точек соответствуют номерам проб в Прил. 1, табл. 1.1.

Fig. 1. Geological characterization of the Sisim igneous area of the Minusinsk trough.

(а) – location of the Sisim area hosted by the Central Asian fold belt; (б) – geological scheme of the Sisim area; (в) – rhyolitic and rhyodacite flows separated by tuffs; (г) – panorama of the trachyte cover; (д) – lower contact of dolerite sill with sandstones.

1 – sedimentary rocks (C_1); 2 – sedimentary rocks (D); 3 – basalts, basaltic trachyandesites, trachyandesites, trachytes, trachydacites, rhyodacites, rhyolites of the Sisim series; 4 – dolerite sills of the Sisim series; 5 – pre-Devonian undivided geological complexes; 6 – geological boundaries; 7 – bedding elements; 8 – sampling points, point numbers correspond to the sample numbers in App. 1, Table 1.

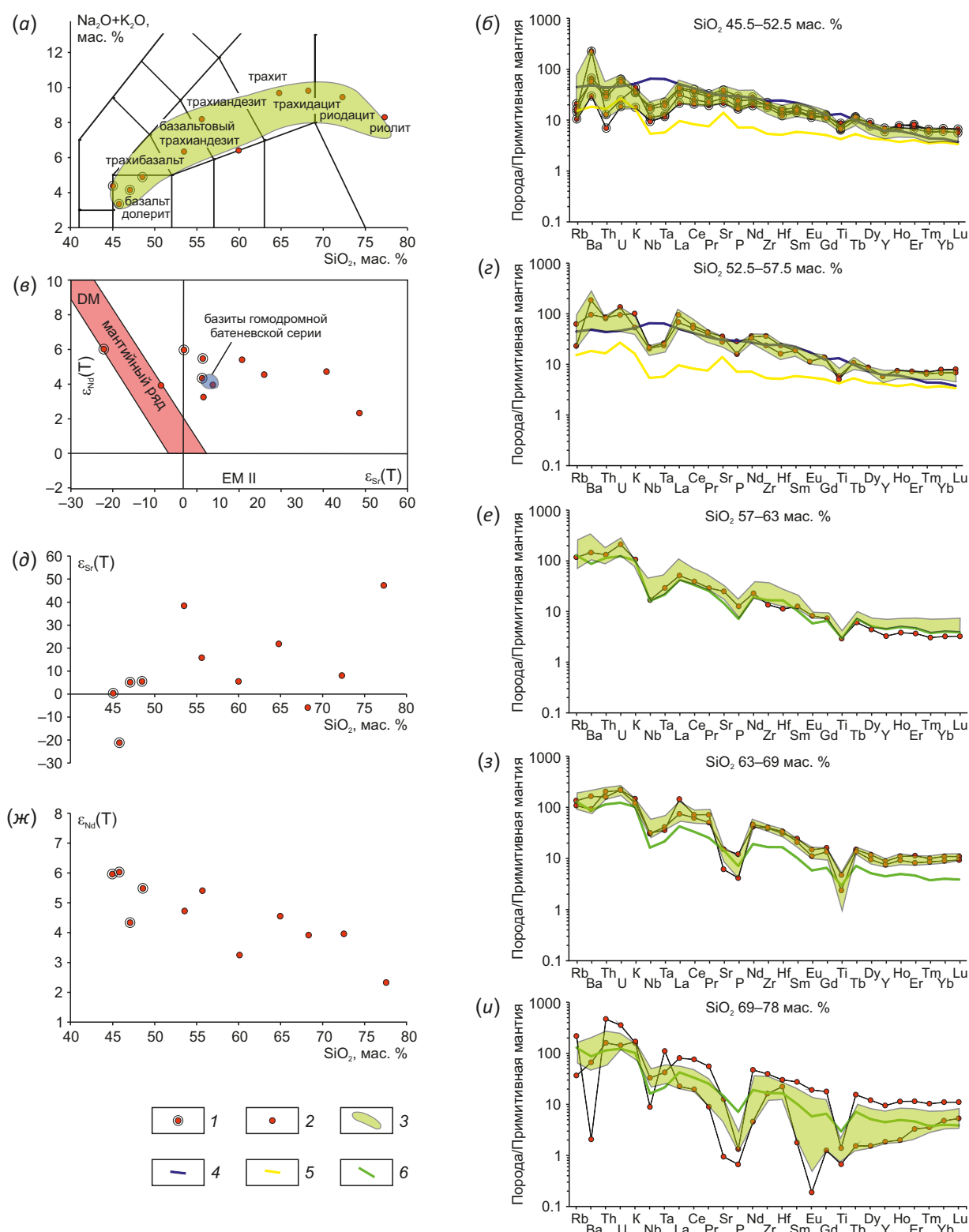


Рис. 2. Состав магматических пород Сисимского ареала.

(а) – TAS диаграмма [Le Bas et al., 1986]; (б, в, г, д, е, ж) – спайдер-диаграммы, нормировка на состав примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989]; (в) – диаграмма $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T}) - \epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$, значения ϵ пересчитаны для $T=405$ млн лет, DM – деплетированная мантия, EMII – мантия, обогащенная радиогенным стронцием [Zindler, Hart, 1986]; (д) – диаграмма $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T}) - \text{SiO}_2$ (мас. %); (ж) – диаграмма $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) - \text{SiO}_2$ (мас. %). 1 – базиты сисимской серии; 2 – промежуточные и сиалические породы сисимской серии; 3 – породы батеневской серии [Vorontsov et al., 2015]; 4 – базальты океанических островов, OIB [Sun, McDonough, 1989]; 5 – базальты островных дуг, IAB [Kelemen et al., 2003]; 6 – верхняя континентальная кора, UCC [Rudnick, Gao, 2003].

Fig. 2. Composition of igneous rocks of the Sisim area.

(а) – TAS diagram [Le Bas et al., 1986]; (б, в, г, д, е, ж) – spider diagrams, normalized to the composition of the primitive mantle [Sun, McDonough, 1989]; (в) – diagram $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T}) - \epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$, ϵ values recalculated for $T=405$ Ma, DM – depleted mantle, EMII – mantle enriched

in radiogenic strontium [Zindler, Hart, 1986]; (d) – diagram $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T}) - \text{SiO}_2$ (wt. %); (ж) – diagram $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) - \text{SiO}_2$ (wt. %). 1 – mafic rocks of the Sisim series; 2 – intermediate and sialic rocks of the Sisim series; 3 – rocks of the Batenevo series [Vorontsov et al., 2015]; 4 – oceanic island basalts, OIB [Sun, McDonough, 1989]; 5 – island arc basalts, IAB [Kelemen et al., 2007]; 6 – upper continental crust, UCC [Rudnick, Gao, 2003].

так и IAB (рис. 2, 6). С первыми их сближают высокие содержания литофильных элементов, типичные для обогащенных мантийных источников [Sun, McDonough, 1989], со вторыми – отрицательные аномалии Nb, Ta, Ti и слабая дифференциация REE, что является признаком умеренно обогащенных H_2O -насыщенных магм, образующихся в субдукционных условиях [Kelemen et al., 2007].

В промежуточных и сиалических породах содержания несовместимых элементов повышаются, в целом сохраняя те же особенности, которые проявляются в базитах. Сохраняются минимумы Nb, Ta, Ti и высокие содержания U (рис. 2, г, е, з, и). Кроме того, в породах с SiO_2 более 63 мас. % (рис. 2, з, и) появляются дополнительные минимумы по Ba, Sr и P. По мере увеличения SiO_2 в сисимской серии крайне слабо проявлено накопление несовместимых элементов, при этом составы промежуточных пород либо приближены к составу верхней континентальной коры, либо слабо превышают его. Сиалические породы с содержанием SiO_2 более 69 мас. % характеризуются широким диапазоном вариаций несовместимых элементов. Среди них выделяются низкощелочные риолиты, которые в наибольшей степени обеднены Ba, Sr, P, Ti, LREE (рис. 2, и).

3.4. Изотопы Sr и Nd в породах

В соответствии с Приложением 1 первичные значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ варьируются от 0.702537 до 0.704401 (ϵ_{Sr} от –21.2 до +5.3) в базитах и от 0.703615 до 0.707351 (ϵ_{Sr} от –5.9 до +47.2) в промежуточных и сиалических породах. Наиболее низкие значения $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T})$ имеет наиболее магнезиальный долерит, $\text{MgO}=8.13$ мас. %; наиболее высокое значение ϵ_{Sr} (47.2) имеет низкощелочной риолит, $\text{SiO}_2=77.30$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=8.30$ мас. %.

Первичные значения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ варьируются от 0.512335 до 0.512422 (ϵ_{Nd} от 4.3 до 6.0) в базитах и от 0.512233 до 0.512391 (ϵ_{Nd} от 2.3 до 5.4) в промежуточных и сиалических породах. Наблюдается отчетливый тренд снижения величины ϵ_{Nd} по мере роста содержания SiO_2 .

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Магмообразование и источники

Основные проблемы образования пород с широким диапазоном SiO_2 касаются оценок состава мантийных, коровых или мантийно-коровых источников магматических расплавов. При анализе мантийных источников различия в составе магм можно объяснить несколькими факторами: мантийной гетерогенностью, разной степенью частичного плавления мантийного субстрата или его плавлением на разных глубинах, фракционной кристаллизацией базитовых магм мантийной природы

или воздействием мантийного плюма на метасоматизированную литосферную мантию. При оценке коровых и мантийно-коровых магматических источников предполагается плавление коровой среды либо смешение базитовых мантийных магм и продуктов их фракционирования с сиалическими расплавами, образованными в ходе анатектического плавления вещества коры. При подобных взаимодействиях анатектические магмы не обогащаются (или даже обедняются) несовместимыми элементами и их состав напрямую зависит от состава вмещающих коровых пород.

Приводимые данные для сисимской серии слишком ограничены, чтобы количественно протестировать модель магматической эволюции, но достаточны для того, чтобы оценить степень участия фракционирования базитовых магм и плавления коровых субстратов с помощью спайдер-диаграмм и зависимостей $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T}) - \epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$, $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T}) - \text{SiO}_2$, $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) - \text{SiO}_2$.

4.2. Базиты

Прежде всего необходимо отметить сходство между базитами антидромных и гомодромных серий. Эталонном последних является Батеневская базальт-андезит-трахитовая серия центральной части Минусинского прогиба [Vorontsov et al., 2015]. Базиты антидромной сисимской и гомодромной батеневской серий являются умеренно щелочными и близки между собой по содержаниям Rb, Th, U, K, Nb, Ta, La, Ce (рис. 2, б). Для базитов обеих серий характерны широкие вариации MgO, что указывает на значимую роль магматической дифференциации мантийных расплавов.

Также важнейшей общей особенностью базитов обеих серий является смещение от линии мантийной корреляции на диаграмме $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T}) - \epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ (рис. 2, в) в сторону субстратов, обогащенных радиогенным стронцием при относительно стабильных значениях $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$. Подобная закономерность указывает на плавление умеренно обогащенной мантии с промежуточными характеристиками между DM и EMII и дополнительного компонента с высоким содержанием Sr, повышенной величиной $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и низкими содержаниями REE. Таким параметрам удовлетворяют осадочные породы с высоким содержанием карбонатов с повышенными значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, деплетированных несовместимыми редкими элементами. Следовательно, как фракционирование мантийных магм, так и ассимиляция ими карбонатных пород дают основной вклад в образование базитов. Из всей совокупности базитов убей-сисимской серии только низкокремнистый и наиболее высокомагнезиальный долерит наиболее близок к составу первичных магм и не подвержен влиянию каких-либо ассимиляционных процессов.

4.3. Промежуточные и сиалические породы

Геологические данные для сисимской серии указывают на отсутствие в основаниях разрезов пород основного состава, что затрудняет отнесение промежуточных и сиалических пород к продуктам фракционирования базитовых магм. Очевидно, что в модели эволюции мы вынуждены принять некоторые допущения и опираться преимущественно на геохимические и изотопные данные. По мере увеличения содержания SiO_2 в породах на фоне общего накопления некогерентных элементов наблюдаются их широкие вариации (рис. 2, г, е, з, и), при этом происходит увеличение $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T})$ (рис. 2, д) и уменьшение $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ (рис. 2, ж). Наиболее высокие значения $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T})$ (47.2) и наиболее низкие значения $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ (2.3) имеет низкощелочной риолит. Именно он обеднен несовместимыми элементами по сравнению со всеми другими типами пород в этой серии (Прил. 1, табл. 1.1). Вероятно, его состав отвечает составу деплетированных анатектических магм, смешение которых с фракционированными базитовыми магмами подавляет накопление в них несовместимых элементов аналогично механизму формирования вулканической серии Батеневского поднятия. Однако в случае сисимской серии эта модель усложняется антидромной последовательностью образования пород и предполагает задержку первичных базитовых магм на недоступных для наблюдения глубинах.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для всего спектра пород (по величине SiO_2) девонских «длинных» серий Минусинского прогиба определены геохимические и Sr-Nd изотопные параметры. В совокупности с результатами предшествующих исследований девонского магматизма Алтае-Саянской рифтовой системы предложены одинаковые петрологические механизмы образования антидромных и гомодромных магматических серий. Для обеих серий реконструируется комбинация фракционной кристаллизации базитовых магм и ассимиляция ими материала континентальной коры с появлением промежуточных и сиалических магм с дисперсными геохимическими характеристиками, высокими значениями $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T})$ и низкими – $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$.

6. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Автор заявляет об отсутствии у него конфликта интересов. Автор прочитал рукопись и согласен с опубликованной версией.

The author has no conflicts of interest to declare. The author has read and agreed to the published version of the manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Babin G.A., Vladimirov A.G., Kruk N.N., Gibsher A.S., Sovetov Yu.K., Sergeev S.A., Sennikov N.V., 2004. Age of the Initiation of Minua Basins, Southern Siberia. *Doklady Earth Sciences* 395 (3), 307–310.

Fedoseev G.S., 2008. The Role of Mafic Magmatism in Age Specification of Devonian Continental Trough Deposits: Evidence from the Minusa Basin, Western Siberia, Russia. *Bulletin of Geosciences* 83 (4), 473–480. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.2008.04.473>.

Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R., 2007. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. In: H.D. Holland, K.K. Turekian (Eds), *Treatise on Geochemistry*. Vol. 3: The Crust. Elsevier, Amsterdam, p. 1–70. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03035-8>.

Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology* 27 (3), 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.

Luchitsky V.V., 1960. *Volcanism and Tectonics of the Devonian Basins in the Minusinsk Intermountain Trough*. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, 276 p. (in Russian) [Луцицкий И.В. Вулканизм и тектоника девонских впадин Минусинского межгорного прогиба. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 276 с.].

Rudnick R.L., Gao S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: H.D. Holland, K.K. Turekian (Eds), *Treatise on Geochemistry*. Vol. 3: The Crust. Elsevier, Amsterdam, p. 1–56. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>.

Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: A.D. Saunders, M.J. Norry (Eds), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London Special Publications 42, 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.

Vorontsov A., Yarmolyuk V., Dril S., Ernst R., Perfilova O., Grinev O., Komaritsyna T., 2021. Magmatism of the Devonian Altai-Sayan Rift System: Geological and Geochemical Evidence for Diverse Plume-Lithosphere Interactions. *Gondwana Research* 89, 193–219. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.09.007>.

Vorontsov A.A., Yarmolyuk V.V., Fedoseev G.S., Perfilova O.Y., Posokhov V.F., Travin A.V., Gazizova T.F., 2015. Differentiated Volcanic Association of the Minusa Trough: Mechanisms of Formation and Sources of Melts, as Exemplified by Batenevo Rise. *Petrology* 23, 353–375. <https://doi.org/10.1134/S0869591115040062>.

Zindler A., Hart S., 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 14, 493–571. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Состав (оксиды в мас. %, элементы в г/т) и Sr-Nd изотопные характеристики пород сисимской серии
Table 1.1. Composition (oxides in wt. %, elements in ppm) and Sr-Nd isotopic characteristics of rocks of the Sisim series

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Порода	Риолит	Трахит	Риодацит	Трахи-андезит	Базальт	Базальт	Базальт	Трахи-андезит	Трахи-дацит	Долерит	Долерит
SiO ₂	77.3	64.77	72.29	59.96	48.54	47.05	45.04	55.58	68.23	45.75	53.47
TiO ₂	0.15	1.03	0.3	0.63	1.62	1.39	1.73	1.08	0.52	1.86	1.27
Al ₂ O ₃	12.29	15.99	14.22	14.94	17.07	16.81	17.69	16.97	15.42	16.31	16.42
Fe ₂ O ₃ *	1.17	4.34	2.35	5.44	10.71	10.31	11.8	7.32	3.17	12.1	9.09
MnO	<0.010	0.17	0.04	0.14	0.18	0.17	0.17	0.1	0.09	0.17	0.16
MgO	<0.050	1.19	0.15	5.05	5.83	6.97	6.09	3.46	0.27	8.13	3.53
CaO	0.15	1.14	0.28	4.92	8.27	8.79	9.43	4.72	0.99	9.3	6.9
Na ₂ O	3.89	5.61	4.78	3.48	3.92	3.16	3.18	5.42	6.49	2.86	4.85
K ₂ O	4.41	4.07	4.66	2.92	0.96	0.99	1.19	2.76	3.33	0.49	1.48
P ₂ O ₅	0.01	0.25	0.03	0.27	0.61	0.51	0.37	0.34	0.09	0.35	0.59
П.п.п.	0.49	1.39	0.89	2.23	2.02	3.86	3.26	2.34	1.38	2.86	2.21
Сумма	99.9	100.18	100.11	100.13	99.9	100.16	100.23	100.29	100.12	100.29	100.2
Rb**	142(166)	87(74)	24(34)	76(85)	9.5(8)	13.6(15)	10.8(12)	41(54)	70(75)	6.9(7.6)	15(23)
Ba	14.9	1183	479	1050	474	413	1618	690	665	214	1339
Sr**	21(19)	332(316)	277(265)	549(536)	856(791)	701(696)	587(660)	777(736)	135(123)	474(547)	641(740)
Zr	188	455	458	158	254	228	238	422	466	205	275
Nb	6.6	23	24	12.4	13.5	12.3	8.3	16	23	6.9	15
Hf	7.1	9.9	9.7	3.6	5.1	4.55	4.45	7.5	10.8	3.94	5.2
Ta	4.62	1.72	1.77	1.23	0.94	0.8	0.53	1.1	1.5	0.49	0.99
Y	8.7	41	44	15	30	27	28	28	35	28	27
Th	43	14.6	14.6	12.2	3.18	2.62	1.17	7.8	18	0.64	7.5
U	7.8	4.83	3.13	4.63	1.39	1.25	0.55	2.09	4.73	0.4	2.97
La	16	54	59	37	31	30	23	69	105	16	49
Ce	37	119	145	75	72	66	47	111	135	39	99
Pr	2.5	14.1	15.6	8.1	8.9	8.1	6.3	12.1	20.1	5.5	11.1
Nd**	6.5(7.80)	58(53.69)	67(62.97)	32(29.28)	40(35.10)	35(32.56)	30(27.33)	49(43.34)	6(64.86)	27(23.63)	47(46.53)
Sm**	0.82(0.91)	11.2(10.15)	12.7(11.16)	5.8(5.13)	8.2(7.19)	7.2(6.59)	6.7(6.16)	8.6(7.55)	9.7(9.63)	6.6(5.68)	8.6(8.45)
Eu	0.033	2.55	3.3	1.42	2.4	2.08	1.93	1.95	1.91	2.11	1.96
Gd	0.76	9.8	10.9	4.46	7.7	6.8	7.3	8.4	8.2	7.1	8.5
Tb	0.15	1.45	1.51	0.6	1.09	0.98	1.06	1.06	1.33	1.06	1.04
Dy	1.17	9	9.2	3.36	6.5	5.9	6.8	6.5	7.2	6.6	6.6
Ho	0.33	1.83	1.9	0.64	1.33	1.18	1.34	1.27	1.53	1.31	1.26
Er	1.63	5.6	5.7	1.82	3.9	3.35	3.77	3.66	4.06	4.01	3.59
Tm	0.28	0.8	0.82	0.24	0.51	0.46	0.53	0.55	0.69	0.53	0.52
Yb	2.38	5.5	5.5	1.61	3.34	2.98	3.42	3.91	4.47	3.37	3.4
Lu	0.42	0.87	0.88	0.26	0.53	0.46	0.53	0.64	0.75	0.54	0.55
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.85372	0.70948	0.70674	0.70707	0.70457	0.70475	0.70435	0.70637	0.71383	0.70277	0.70725
±2σ	0.00001	0.00001	0.00001	0.00002	0.00003	0.00001	0.00001	0.00002	0.00003	0.00003	0.00002
ε _{Sr} (405)	47.2	21.7	8	5.5	5.3	5.1	0.3	15.8	-5.9	-21.2	38.4
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.51242	0.51265	0.51262	0.51256	0.51272	0.51266	0.51278	0.51267	0.51255	0.51281	0.51265
±2σ	0.00001	5E-06	5E-06	4E-06	5E-06	6E-06	5E-06	8E-06	3E-06	8E-06	5E-06
ε _{Nd} (405)	2.3	4.5	4	3.2	5.5	4.3	6	5.4	3.9	6	4.7

Примечание. Fe₂O₃* представляет общее железо. Rb**, Sr**, Nd** и Sm** определены дважды: значения без скобок – методом ICP, в скобках – методом изотопного разбавления. Величины ε_{Sr}(405) и ε_{Nd}(405) рассчитаны из концентраций Rb, Sr, Sm и Nd, определенных методом изотопного разбавления.

Note. Fe₂O₃* represents total iron. Rb**, Sr**, Nd**, and Sm** were twice determined: the values without brackets were determined by the ICP method; those in brackets were determined by the isotope dilution method. The ε_{Sr}(405) and ε_{Nd}(405) values were calculated from the Rb, Sr, Sm, and Nd concentrations determined by the isotopic dilution method.