

ПЕТРОЛОГИЯ

УДК 550.42: 552.3

ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД И КАРБОНАТИТОВ В СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЯХ СЕВЕРНОЙ И ЗАПАДНОЙ АЗИИ: ОБЗОР НОВЕЙШИХ ДАННЫХ



В.В. Врублевский¹, А.Г. Дорошкевич^{2,3}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

³Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Обсуждаются современные данные по изотопному составу неопротерозойских, палеозойских и мезозойских щелочных пород и карбонатитов в горно-складчатых сооружениях Енисейского кряжа и западного сегмента Центрально-Азиатского орогенического пояса. Первичные отношения изотопов Nd, Sr и Pb в магматических комплексах свидетельствуют о гетерогенных источниках расплавов со смешением вещества умеренно деплетированного (PREMA/FOZO, HIMU) и обогащенного (EM) доменов сублитосферной мантии. Доля EM-компонента возрастает в производных позднепалеозойского и мезозойского магматизма. В условиях более мощной материковой коры воздействие плюмовых магм на субстрат метасоматизированной литосферной мантии могло приводить к образованию очагов гибридных расплавов. Одновременное обогащение щелочных пород и карбонатитов радиогенным ⁸⁷Sr и тяжелыми изотопами O, C и S указывает на вероятность верхнекоревой контаминации. По соотношению $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в порообразующем карбонате выделяется группа мантийно-коровых карбонатитов. Геодинамические обстановки магматизма отражают общий структурный стиль разных эпох тектогенеза. В неопротерозе проявлена взаимосвязь плюмовой активности и глубоко проникающих рифтов при расколе суперконтинента Родинии. Последующее развитие Палеоазиатского океана с формированием аккреционно-коллизийных комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса в палеозое приводило к развитию магматизма в условиях взаимодействия мантийного плюма с бывшей активной окраиной континента. Происходившие в мезозое процессы рифтогенеза могли не достигать сублитосферного уровня, и плюмовая деятельность ограничивалась инициацией плавления континентальной литосферной мантии.

Ключевые слова: щелочные породы, карбонатиты, изотопная геохимия, плюм-литосферное взаимодействие

Введение

Формирование большинства ассоциаций изверженных щелочных пород и карбонатитов, как на континентах, так и в океанах, происходит во внутриплитной геодинамической обстановке и может быть связано с активностью мантийных плюмов [Simonetti et al., 1998; Bell, Tilton, 2001; Hoernle et al., 2002; Bell, Simonetti, 2010; Ernst, Bell, 2010]. При таком тектоническом режиме в процессах магмогенерации участвует вещество преимущественно глубоководных резервуаров. Возникающие расплавы обычно представляют собой продукты смешения материала из доменов умеренно деплетированной (HIMU, PREMA/FOZO) и обогащенной (EM) сублитосферной мантии [Bell, Tilton, 2001; Bell, Simonetti, 2010]. Присутствие мантийных компонентов в первичных магмах наиболее отчетливо прослеживается по вариациям изотопного состава Nd, Sr, Hf и Pb в изверженных породах [Stacey, Kramers, 1975; De Paolo, Wasserburg, 1979; Zartman, Doe, 1981; Zartman, Haines, 1988; Zindler et al., 1982; Zindler, Hart, 1986; Wilson, 1989; Salters, Hart, 1991; Hart et al., 1992; Bli-

chert-Toft, Albarède, 1997; Chauvel, Blichert-Toft, 2001; Hofmann, 2003; Stracke et al., 2005; Dickin, 2005; Bouvier et al., 2008; Chauvel et al., 2008].

Во многих случаях глубинный уровень магмогенерации также фиксируется по соотношению стабильных изотопов углерода (для карбонатной составляющей), кислорода, водорода и серы в порообразующих минералах [Taylor et al., 1967; Taylor, 1968; Conway, Taylor, 1969; Sheppard, 1986; Taylor, Sheppard, 1986; Кулешов, 1986; Deines, 1989; Keller, Hoefs, 1995; Santos, Clayton, 1995; Ray, Ramesh, 1999; Tappe et al., 2008; Farrell et al., 2010; Giuliani et al., 2014; Bell et al., 2015; Vladykin, Pirajno, 2021].

На основании соотношений радиогенных и стабильных изотопов в составе интрузий предлагаются различные диаграммы их систематики по источникам вещества, геодинамической обстановке формирования и особенностям петрогенезиса. Для сравнительного анализа разнородных магматических ассоциаций обычно применяются универсальные диаграммы $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$, $\epsilon_{\text{Nd}}-\epsilon_{\text{Sr}}$, $\epsilon_{\text{Hf}}-\epsilon_{\text{Nd}}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ или их модификации.

В складчато-глыбовых областях ювенильная природа магм нередко маскируется эффектами их коровой контаминации.

Показательным примером плюм-литосферного взаимодействия служат разновозрастные плутонические и вулканические ассоциации щелочных пород и карбонатитов на Енисейском кряже и в западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) – в Кузнецком Алатау, Горном Алтае, Западной и Юго-Восточной Туве, Саянах, Прибайкалье и Западном Забайкалье, Монголии и Южном Тянь-Шане [Покровский и др., 1998; Morikiyo et al., 2001; Никифоров и др., 2002, 2006, 2019; Врублевский и др., 2003а, 2003б, 2004, 2012, 2016, 2018а, 2019; Никифоров, Ярмолук, 2007; Сазонов и др., 2007; Воронцов и др., 2013; Крупчатников и др., 2015; Врублевский, 2015; Врублевский, Гертнер, 2021; Doroshkevich et al., 2012, 2016; Дорошkevich и др., 2018; Избродин и др., 2017; Vrublevskii et al., 2018, 2019а, 2019б, 2020, 2021, Nikiforov, Yarmolyuk, 2019; Vorontsov et al., 2021а, 2021б].

Проведенный нами сравнительный анализ изотопных данных, полученных преимущественно по К-На щелочным породам и карбонатитам этих регионов за последние 30 лет, позволяет определить источники и особенности изотопной эволюции первичных магм, а также характер и масштабы их взаимодействия с различными литосферными субстратами.

Краткая геологическая характеристика

Среди рассмотренных в обзоре ассоциаций изверженных щелочных пород и карбонатитов в складчатых областях Северной и Западной Азии выделяются производные неопротерозойского палеозойского и мезозойского магматизма (рис. 1). Их геолого-петрографические особенности приведены в таблице.

Неопротерозойские ассоциации. По изотопно-геохронологическим данным в неопротерозое (~ 730–610 млн лет) сформировались плутонические комплексы: пенченгинский фенит-карбонатитовый и среднетатарский (заангарский) ийолит-фойяитовый на Енисейском кряже [Свешникова и др., 1976; Врублевский и др., 2003б, 2011; Сазонов и др., 2007; Верниковский и др., 2008], зиминский ультраосновной щелочной в Восточном Саяне [Фролов и др., 2003; Doroshkevich et al., 2016; Хромова и др., 2020], а также карбонатитовые проявления Пограничное и Веселое в Северном Забайкалье (Байкало-Муйский пояс) [Дорошkevich и др., 2011]. Предполагается, что развитие внутриплитного щелочного и карбонатитового магматизма происходило в эпоху рифтогенного раскалывания Родинии [Ярмолук и др., 2005; Yarmolyuk et al., 2014; Ножкин и др., 2008; Кузьмин, Ярмолук, 2014]. В связи с этим его проявления приурочены к зонам глубинных разломов или грабеноподобным структурам среди метаморфизованных отложений протерозоя.

Палеозойские ассоциации. Формирование плутонических комплексов щелочных пород и карбонатитов в палеозое связано с геотектонической эволюцией каледонид в западной части ЦАСП. Наиболее ранними являются кембрийские (~ 510–490 млн лет) производные подобного магматизма. Они образуют интрузивные массивы в Кузнецком Алатау (Верхнепетропавловский) [Врублевский и др., 2003а; Врублевский, 2015], Горном Алтае (Эдельвейс) [Врублевский и др., 2012], Юго-Восточной Туве (Харлы, Баянкол, Дахунур, Чик) [Яшина, 1982; Сальникова и др., 2018; Врублевский и др., 2019; Vrublevskii et al., 2020] и Западном Забайкалье (Сайженский, Снежный, Нижнебурульзайский, Гулхенский) [Doroshkevich et al., 2012].

Силикатные породы в их строении в разной степени представлены субщелочными и щелочными габброидами и клинопироксенитами, ультраосновными и основными фойдолитами, нефелиновыми и щелочными сиенитами. Сходный петрографический состав имеют позднесилурийские (~ 426 млн лет) и девонские (~ 410–385 млн лет) щелочные интрузивы Прихубсугуля (СЗ Монголия) и Мариинской Тайги (северный сегмент Кузнецкого Алатау) соответственно [Врублевский и др., 2014; Vrublevskii et al., 2019а; Врублевский, Гертнер, 2021]. Среди более молодых (~ 310–265 млн лет) проявлений щелочного магматизма на Сангиленском (ЮВ Тува) и Витимском (Западное Забайкалье) нагорьях, в Кузнецком Алатау доминируют нефелиновые и щелочные сиениты [Яшина, 1982; Doroshkevich et al., 2012; Никифоров и др., 2019; Vrublevskii et al., 2021]. Считается, что генерация и внедрение первичных магм могут быть вызваны активностью мантийных плюмов и процессами континентального рифтообразования [Yarmolyuk et al., 2014]. При формировании раннепалеозойских ассоциаций рассматривается вероятность взаимодействия плюма с аккреционными литосферными комплексами [Врублевский, 2015; Vrublevskii et al., 2020; Врублевский, Гертнер, 2021].

Мезозойские ассоциации. В рассмотренных карбонатитосодержащих комплексах позднего триаса (Матчайский плутон, ~ 220 млн лет, Южный Тянь-Шань) и раннего мела (халютинский комплекс, Ошурковский массив, ~ 120–130 млн лет, Западное Забайкалье; комплекс Мушугай-Худук, ~ 130–140 млн лет, Южная Монголия) силикатные изверженные породы характеризуются повышенным содержанием K_2O и относятся к щелочно-базитовой (слюдяной пироксенит–шонкинит/тешенит/эссексит–щелочной сиенит) магматической серии [Никифоров и др., 2000; Дорошkevich, Рипп, 2009; Vrublevskii et al., 2018; Nikolenko et al., 2020]. Для карбонатитов Центральной Тувы (Карасугская и Улатайская рудные зоны, ~ 120 млн лет) характерно отсутствие видимой связи с щелочными изверженными породами, они образуют

группу автономных малых интрузий в краевой части девонского тектонического прогиба [Никифоров и др., 2006]. Для отмеченных проявлений магматизма предполагаются мантийные источники расплавов, процессы их фракционирования, коровой контаминации и флюидного взаимодействия.

Изотопный состав пород

По современным представлениям комплексы щелочных пород и карбонатитов характеризуются гетерогенными источниками вещества, различными условиями образования и внедрения первичных магм, а также механизмами их разделения на силикатные и карбонатные расплавы [Bell, 1989; Bell et al., 1998; Bell, Tilton, 2001; Mitchell, 2005; Bell, Simonetti, 2010; Jones et al., 2013]. При этом изотопные составы большинства

подобных изверженных пород на кратонах обладают изотопными сигнатурами мантийных производных. Наблюдаемые вариации трактуются как результат (I) смешения материала из разных доменов мантии; (II) контаминации непосредственно магматического источника, например при погружении слэба; (III) фракционирования расплавов. В отличие от платформ, при формировании карбонатитосодержащих комплексов в складчатых областях происходит более заметное плюм-литосферное взаимодействие с участием материала верхней коры [Врублевский и др., 2012; Doroshkevich et al., 2012; Vrublevskii et al., 2018, 2019a; 2020, 2021; Vrontsov et al., 2021a, 2021b; Врублевский, Гертнер, 2021; Nikiforov et al., 2021]. Для генетической интерпретации рассмотренных в обзоре ассоциаций наиболее представительными являются выборки данных по изотопному составу C, O, Nd Sr в породах и минералах.

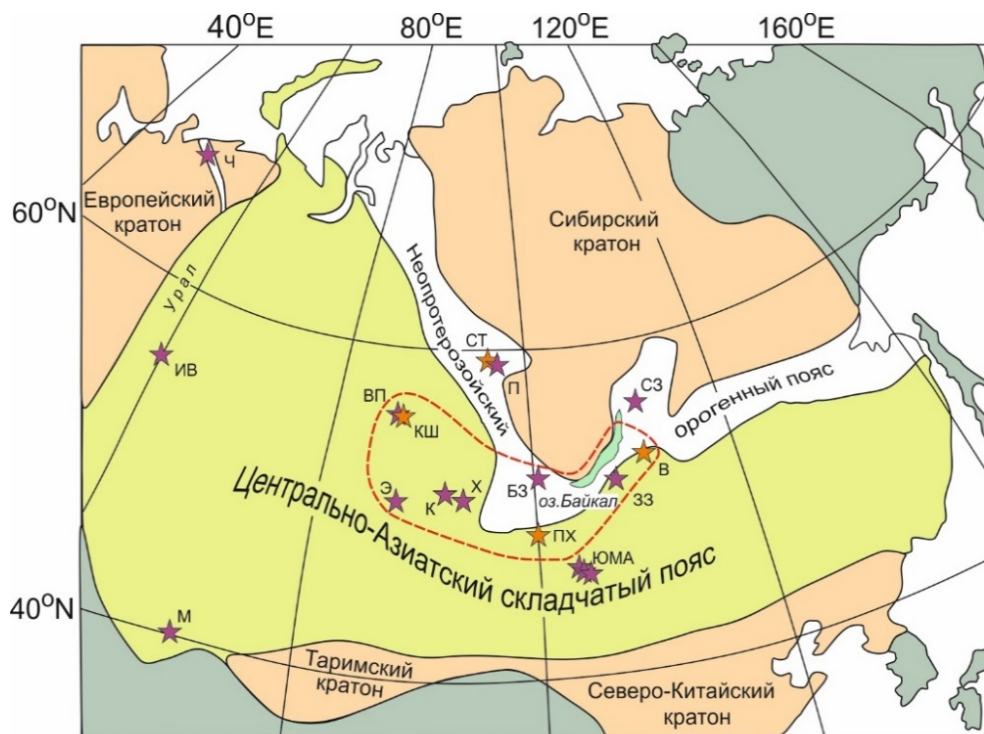


Рис. 1. Расположение центров щелочного и карбонатитового магматизма в складчатых областях Северной и Западной Азии (тектоническая схема по [Sengör et al., 1993])

Звездами сиреневого и оранжевого цвета отмечены комплексы щелочных пород и карбонатитов и комплексы щелочных пород с магматическим кальцитом соответственно: П = пенченгинский и СТ = среднетатарский (Заангарский плутон) на Енисейском кряже, БЗ = зиминский (плутон Белая Зима, Восточный Саян), СЗ = Северное Забайкалье (проявление Пограничное, Веселое), В = плутоны Витимской провинции, ЗЗ = Западное Забайкалье, ЮМА = Южно-Монгольский ареал, ПХ = плутоны Южного Прихубсугуля, Х = харлинский (ЮВ Тува), К = карасугский (Центральная Тува), Э = эдельвейс (Горный Алтай), ВП = верхнепетропавловский и КШ = кия-шалтырский (Кузнецкий Алатау), М = матчайский (Туркестано-Алай, Южный Тянь-Шань), ИВ = ильмено-вишневогорский (Южный Урал), Ч = четласский (Средний Тиман). Красной пунктирной линией оконтурен раннепалеозойский «след» Северо-Азиатского суперплюма [Yarmolyuk et al., 2014]

Fig. 1. Location of the alkaline and carbonatite magmatic centers in the folded areas of North and West Asia (tectonic scheme after [Sengör et al., 1993])

Lilac and orange stars mark complexes of alkaline rocks and carbonatites, and complexes of alkaline rocks with magmatic calcite, respectively: P = Penchenga and ST = Srednetatsky (Zaangarsky complex) on the Yenisei Ridge, BZ = Ziminsky (Belaya Zima complex, Eastern Sayan), NW = North Transbaikalia (Pogranichnoe, Veseloe), V = alkaline complexes of Vitim province, ZZ = West Transbaikalia, YMA = South Mongolian area, PX = South Prikhubsugul complexes, X = Kharlinsky (SE Tuva), K = Karasug (Central Tuva), E = Edelweiss (Gorny Altai), VP = Verkhne Petropavlovsk and KSh = Kiya-Shaltyrsky (Kuznetsk Alatau), M = Matchaisky (Turkестano-Alai, Southern Tien Shan), IV = Ilmeno-Vishnevogorsky (Southern Urals), Ch = Chetlasky (Timan). The red dashed line outlines the Early Paleozoic "sign" of the North Asian superplume [Yarmolyuk et al., 2014]

Общая характеристика реперных щелочных и карбонатитовых комплексов

General characteristics of reference alkaline and carbonate complexes

Регион	Комплекс (массив)	Возраст, млн лет, (изотопный метод)	Магматическая ассоциация (серия)	Тип и форма тел карбонатитов	Главные, второстепенные и акцессорные минералы карбонатитов	Изверженные силикатные породы ассоциации	Литературные ссылки
Неопротерозойские ассоциации							
Енисейский край	Пенчегинский	Криогенный, 726 (Ag–Ar)	Фенил-карбонатитовая	Доломитовые; пластоинтообразные залежи	Ферродоломит, магнезиоарфведсонит, флогопит, апатит, пироксенол, магнетит, пирротин	Не установлены	Врублевский и др., 2003б, 2011; Vrublevskii et al., 2019b
	Среднетатарский (Зангарский)	Криогенный, 711–700 (U–Pb)	Щелочная основная	Нет данных	Нет данных	Основные фойдолиты, фойяиты	Сазонов и др., 2007; Верниковский и др., 2008
Северное Забайкалье	Пограничный	Эдиакарий, 625 (Ag–Ar)	Карбонатиты с реакционными фенитами	Доломитовые; дайкообразное тело	Доломит, магнетит, апатит, эпирин, ортоклаз, флогопит, арфведсонит, кальцит, графит, пироксенол	Не установлены	Рипп и др., 2009; Doroshkevich et al., 2007a, 2007b
	Веселый	Эдиакарий, 593 (U–Pb)	Карбонатиты с зонами глиммеритов	Доломитовые; дайки	Доломит, апатит, кальцит, рутил, магнетит, рибекит, циркон	Не установлены	Фролов и др., 2003; Ярмолюк и др., 2005; Doroshkevich et al., 2016; Sahnko-va et al., 2019
Восточный Саян	Заминский (Белозиминский)	Эдиакарий, 650–640 (U–Pb, Ag–Ar)	Щелочная ультраосновная	Кальцитовые, доломитовые анкеритовые; штокообразное и жильные тела	Ca-Mg-Fe карбонаты, Fe-Mg силикаты, магнетит, апатит, Ta-Nb оксиды, REE-F-карбонаты, бадделит, циркон, бурбанкит, монацит, барит, пирит	Фойдолиты, фойяиты	
Палеозойские ассоциации							
Горный Алтай	Эдельвейс	Средний кембрий, 507 (Ar–Ar)	Щелочная основная	Кальцитовые; дайки, жилы	Кальцит, флогопит, апатит, доломит, пироксенол, пирит	Щелочной клинопиксенит, щелочной сиенит	Врублевский и др., 2009, 2012
Кузнецкий Алатау	Верхнепетропавловский	Средний кембрий, 509 (Sm–Nd)	Щелочная основная	Кальцитовые; жилы	Кальцит, клинопиксен, флогопит, монтицеллит, апатит, магнетит, пирротин	Субщелочное габбро, тералит, фойдолиты, ювит, фойяит	Врублевский, 2015
	Кия-Шалтырь, Кургуеулю, Белогорский, Дедовогорский	Ранний-средний девон, 410–385 (U–Pb, Sm–Nd)	Щелочная основная	Нет данных	Нет данных	Субщелочное габбро, тералит, фойдолиты, ювит, фойяит	Врублевский и др., 2014, 2016; Врублевский, Гертнер, 2021
	Горячегорский	Поздняя пермь, 265 (U–Pb)	Щелочная основная	Нет данных	Нет данных	Основные фойдолиты, фойяиты	Vrublevskii et al., 2021
Юго-Восточная Тува	Харлинский	Поздний кембрий, 500–490 (U–Pb, Sm–Nd)	Щелочная основная	Кальцитовые; жилы	Кальцит, Fe-Mg силикаты, K-Na полевые шпаты, нефелин, апатит, Ti-гранат, сфен, магнетит, ильменит, карбоцернаит	Якупирангит-мельтейгит, ийолиты, уртит, ювит, фойяиты	Сальникова и др., 2010, 2018; Врублевский и др., 2019; Vrublevskii et al., 2020
	Сангиленский (?)	Ранняя пермь, 310–295 (K–Ar, U–Pb)	Щелочная салическая	Нет данных	Нет данных	Щелочные и нефелиновые сиениты	Яшина, 1982; Никифоров и др., 2019;
Палеозойские ассоциации							
Северо-Западная Монголия	Овермарагт-Гол	Поздний силур, 426 (U–Pb)	Щелочная ультраосновная-основная	Нет данных	Нет данных	Щелочное габбро, фойдолиты, нефелиновые сиениты	Яшина, 1982; Vrublevskii et al., 2019a

Регион	Комплекс (массив)	Возраст, млн лет, (изотопный метод)	Магматическая ассоциация (серия)	Тип и форма тел карбонатитов	Главные, второстепенные и акцессорные минералы карбонатитов	Изверженные силикатные породы ассоциации	Литературные ссылки
Западное Забайкалье	Сайжа, Гулхен, Снежный, Ниж Бурульзай	Средний кембрий-ранний ордовик, 520–486 (U-Pb)	Щелочная ультраосновная-основная	Нет данных	Нет данных	Клинопироксениты, фойдиты, щелочные и нефелиновые сиениты	Doroshkevich et al., 2012; Дорошкевич и др., 2014
	Мухальский, Верх Бурульзай	Поздний карбон-пермь, 310–290 (U-Pb)	Щелочная ультраосновная-основная	Нет данных	Нет данных	Клинопироксениты, фойдиты, щелочные и нефелиновые сиениты	Doroshkevich et al., 2012
	Зимовечинский, Тучинский, Кома	Поздний карбон-пермь, 310–280 (U-Pb)	Щелочная саллическая	Нет данных	Нет данных	Щелочные сиениты, нефелиновые сиениты	Izbrodin et al., 2020
	Амалатский, Сириктинский	Поздняя пермь, 265–255 (Ar-Ar)	Щелочная саллическая	Нет данных	Нет данных	Щелочные сиениты, нефелиновые сиениты	Дорошкевич и др., 2018
Мезозойские ассоциации							
Южный Тянь-Шань	Матчинский	Поздний триас, 220 (Ar-Ar, Rb-Sr)	Щелочная основная	Доломит-кальцитовые; дайки, жилы, линзы	Кальцит, доломит, Fe-Mg силикаты, микроклин, альбит, апатит, магнетит, ильменит, пиррохлор, сфен, циркон, монацит, пирротин, бадделейт, стронцианит, барит	Щелочное габбро и сиениты, нефелиновые сиениты	Vnublevskii et al., 2018
Западное Забайкалье	Халютинский, Аршанский, Ошурковский, Торейский, Южный	Ранний мел, 130–110 (U-Pb, Rb-Sr)	Щелочная основная	Кальцитовые; покровы, дайки, линзы, жилы	Кальцит, доломит, флогопит, апатит, рихтерит, магнетит, пиррохлор, сфен, ортит, циркон, монацит, флюорит, REE-F-карбонаты, баритоцелестин, барит, стронцианит	Субщелочное габбро, шонкинит, тефриты, сиениты щелочные и нефелиновые, фонолиты	Никифоров и др., 2002; Рипп и др., 2009; Doroshkevich et al., 2010
Южная Монголия	Мушугай-Худук, Баян-Хушу, Улугей-Хил, Лугин-Гол	Триас, 245 (Лугин-Гол); ранний мел, 145–120 (Rb-Sr, Ar-Ar)	Щелочная основная	Кальцитовые, нейки, дайки, штокверки, жилы	Кальцит, апатит, магнетит, флогопит, ильменит флюорит, REE-F-карбонаты, стронцианит, барит, целестин, кварц	Щелочное габбро, монациты, сиениты, трахиты, нефелиновые сиениты, фонолиты	Baatar et al., 2013; Nikolenko et al., 2020; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019
Центральная Тува	Карасутский, Улагайский	Ранний мел, 130–110 (Rb-Sr, Ar-Ar, U-Pb, Sm-Nd)	Карбонатитовая	Анкерит-кальцитовые; сидеритовые, диагреды, дайки, жилы, штокверки	Кальцит, анкерит, сидерит, апатит, мусковит, пирит, молибденит, гематит, кварц, монацит, бастнезит, паризит, барит, флюорит	Не установлены	Никифоров и др., 2006; Sahnikova et al., 2010; Prokoryev et al., 2016; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019

Углерод и кислород. Изотопный состав CO_2 в неизмененных эндогенных карбонатах варьирует в узких пределах (рис. 2). По разным оценкам, область значений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в первичном кальците и доломите из карбонатов (PIC = primary igneous carbonates) ограничивается интервалами от -8 до -4 ‰ для $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ и от $+6$ до $+10$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ [Conway, Taylor, 1969; Keller, Hoefs, 1995].

мате из карбонатов (PIC = primary igneous carbonates) ограничивается интервалами от -8 до -4 ‰ для $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ и от $+6$ до $+10$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ [Conway, Taylor, 1969; Keller, Hoefs, 1995].

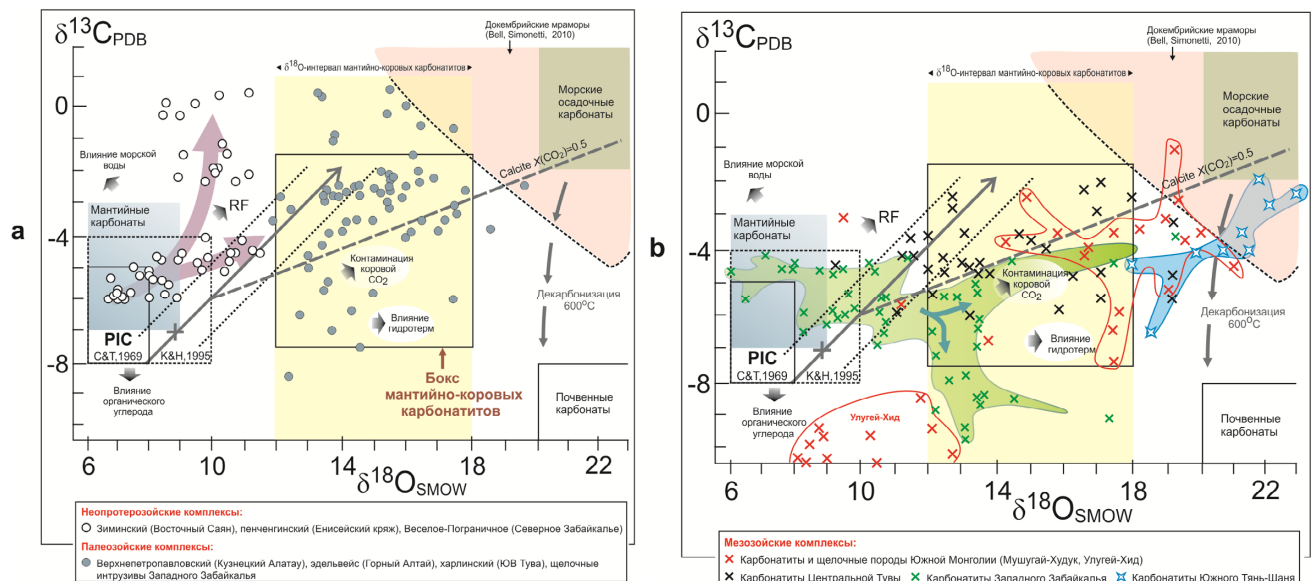


Рис. 2. Изотопный состав углерода и кислорода изверженных щелочных пород и карбонатов докембрия и палеозоя (а), мезозоя (б) в складчатых областях Северной и Западной Азии

а – неопротерозой: Енисейский кряж, Восточный Саян, Северное Забайкалье [Лалин и др., 1987; Врублевский и др., 2003b; Vrublevskii et al., 2019b; Дорошкевич и др., 2011; Дорошкевич, 2013; Doroshkevich et al., 2016; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019]. Палеозой: Кузнецкий Алатау, Горный Алтай, ЮВ Тува (Сангилен), Западное Забайкалье [Врублевский и др., 2012, 2015, 2019; Врублевский, Гертнер, 2021; Vrublevskii et al., 2020, 2021; Doroshkevich et al., 2012; Nikiforov et al., 2021]. **б** – мезозой: Западное Забайкалье, Центральная Тува, Южная Монголия, Южный Тянь-Шань [Баскина и др., 1977; Кулешов, Первов, 1982; Никифоров и др., 2000, 2006; Дорошкевич, Рипп, 2009; Vrublevskii et al., 2018; Nikolenko et al., 2020; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019]. Показаны составы магматогенных карбонатов PIC (C & T = Conway, Taylor, 1969; K & H = Keller, Hoefs, 1995), мантийных карбонатов (модифицировано по Tappe et al., 2008; Giuliani et al., 2014), морских осадочных и почвенных карбонатов, по [Покровский, 2000]; направление изотопных сдвигов при рэлеевском фракционировании и коровой контаминации карбонатного расплава, влиянии поздних гидротерм, морской воды и органического углерода, по [Demeny et al., 1998], реакции декарбонизации [Nikiforov et al., 2021]. Элементы модели рэлеевского изотопного фракционирования (Rayleigh isotopic fractionation model) первона- чального карбонатного расплава (крест) с вариациями состава $\pm 1\%$ $\delta^{18}\text{O}$ (сплошная и точечные линии) и молярного соотно- шения $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 = 0,9$ при 700°C , по [Ray, Ramesh, 2000]. Пунктир-линия соответствует изотопным изменениям кальцита при взаимодействии магматического флюида с известняком [Bowman, 1998] с различным значением отношения флюид/порода и мольной доли $\text{XCO}_2 = 0,5$ во флюиде, по [Smith et al., 2015]. Применялись стандарты: PDB = Belemnite of the Cretaceous Peedee formation (Калифорния), замена на NBS-18 (carbonatite) и NBS-19 (marine limestone); SMOW = Standard Mean Ocean Water, замена на V-SMOW

Fig. 2. Carbon and oxygen isotopic composition of the Neoproterozoic and Paleozoic (a), Mesozoic (b) alkaline sili- cate rocks and carbonatites in the folded areas of North and West Asia

а – Neoproterozoic: Yenisei Ridge, Eastern Sayan, North Transbaikalia [Lapin et al., 1987; Vrublevskii et al., 2003b; Vrublevskii et al., 2019b; Doroshkevich et al., 2011; Doroshkevich, 2013; Doroshkevich et al., 2016; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019]. Paleozoic: Kuznetsk Alatau, Gorny Altai, SE Tuva (Sangilen), West Transbaikalia [Vrublevskii et al., 2012, 2015, 2019; Vrublevskii, Gertner, 2021; Vrublevskii et al., 2020, 2021; Doroshkevich et al., 2012; Nikiforov et al., 2021]. **б** – Mesozoic: West Transbaikalia, Central Tuva, South Mongolia, Southern Tien Shan [Baskina et al., 1977; Kuleshov, Pervov, 1982; Nikiforov et al., 2000, 2006; Doroshkevich, Ripp, 2009; Vrublevskii et al., 2018; Nikolenko et al., 2020; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019]. The compositions of primary igneous carbonates (PIC) (C & T = Conway, Taylor, 1969; K & H = Keller, Hoefs, 1995), mantle carbonates (modified after Tappe et al., 2008; Giuliani et al., 2014), marine and soil carbonates [Pokrovskii, 2000] are shown; and the main schematic isotope shifts during Rayleigh fractionation and crustal contamination of carbonate melt, the influence of late hydrothermal fluids, seawater and organic carbon [Demeny et al., 1998], the decarbonation reaction [Nikiforov et al., 2021]. The Rayleigh isotopic fractionation model of the initial carbonate melt (cross) with compositional variations $\pm 1\%$ $\delta^{18}\text{O}$ (solid and dotted lines) and molar ratio $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 = 0.9$ at 700°C , according to [Ray, Ramesh, 2000]. The dotted line corresponds to isotopic changes during the magmatic fluid-limestone interaction [Bowman, 1998] with different values of the fluid/rock ratio and mole fraction $\text{XCO}_2 = 0.5$ in the fluid, according to [Smith et al., 2015]. Used standards: PDB = Belemnite of the Cretaceous Peedee formation (California), substitution for NBS-18 (carbonatite) and NBS-19 (marine limestone); SMOW = Standard Mean Ocean Water, substitution for V-SMOW

Сходный состав ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ от -7 до -3 ‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ от $+6$ до $+10$ ‰) имеют мантийные карбонаты, которые являются порообразующими минералами кимберлитов и аилликов [Tappe et al., 2008; Giuliani et al., 2014; Wang et al., 2021]. Считается, что более значительные отклонения в той или иной степени могут быть обусловлены рэлеевским изотопным фракционированием или коровой контаминацией карбонатитового расплава, а также влиянием морской воды, органического углерода, нагретых метеорных вод и низкотемпературных гидротерм [Demeny et al., 1998; Giuliani et al., 2014].

Интервал величин $\delta^{13}\text{C}$ ($\sim$ от -6 до -4 ‰) и $\delta^{18}\text{O}$ ($\sim$ от $+7$ до $+11$ ‰) в карбонатах из рассмотренных неопротерозойских комплексов Восточного Саяна и Енисейского кряжа обычно соответствует мантийному диапазону (см. рис. 2, а). Наблюдаемая прямая корреляция изотопных отношений сопоставима с трендом высокотемпературного (700 °C) рэлеевского фракционирования модельного карбонатного расплава. Если допустить, что карбонатиты Северного Забайкалья имели сходный источник, то возрастание в них содержания тяжелых изотопов ^{13}C и ^{18}O могло быть вызвано влиянием вмещающих мраморов докембрия.

Для большинства первичных карбонатов из палеозойских щелочных пород и карбонатитов Алтае-Саянской складчатой области и Западного Забайкалья отмечаются более широкие вариации значений $\delta^{13}\text{C}$ ($\sim$ от $-7,5$ до $-1,5$ ‰) и $\delta^{18}\text{O}$ ($\sim$ от $+12$ до $+18$ ‰), которые группируются на диаграмме $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ в области между составами гипогенных и осадочных карбонатов (рис. 2, а). Наиболее неоднородным изотопным C–O составом обладают порообразующие карбонаты в магматических ассоциациях мезозоя. При максимальных сдвигах величины $\delta^{13}\text{C}$ ($\sim$ от -11 до -1 ‰) наблюдаемые вариации $\delta^{18}\text{O}$ ($\sim$ от $+6$ до $+23$ ‰) полностью перекрывают диапазон этих отношений от мантийных до морских осадочных карбонатов (рис. 2, б). Несмотря на изотопное отличие карбонатитов из разных комплексов, значительная часть их составов попадает в интервал значений $\delta^{18}\text{O}$, характерных для аналогичных производных палеозойского магматизма.

Неодим и стронций. Изотопный Nd–Sr состав изверженных пород, в том числе карбонатитов, является важным индикатором процессов магмо- и петрогенезиса [De Paolo, Wasserburg, 1979; Zindler, Hart, 1986; Bell et al., 1998; Dickin, 2005; Bell, Simonetti, 2010]. В связи с отсутствием фракционирования радиогенных изотопов допускается, что первичные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в породах/расплавах могут свидетельствовать о природе их протолита. При этом щелочной и карбонатитовый магматизм обычно связывается с плюмовой активностью и смешением вещества деплетированной (PREMA/FOZO/HIMU-типы) и обогащенной (EM1/EM2-типы) мантии.

За редким исключением первичные изотопные параметры щелочных пород и карбонатитов позднедокембрийских комплексов Восточного Саяна, Енисейского кряжа и Северного Забайкалья изменяются в диапазоне значений $\epsilon_{\text{Nd}}(t) \approx$ от 0 до $+5,5$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) \approx 0,702$ – $0,7043$ (рис. 3, а). Состав ассоциаций раннего и среднего палеозоя характеризуется сходными вариациями $\epsilon_{\text{Nd}}(t) \approx$ от 0 до $+8,7$, но более широким интервалом $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) \approx 0,703$ – $0,7074$. Изотопная эволюция щелочного магматизма в позднем палеозое имеет региональные особенности. При этом, если состав комплексов Кузнецкого Алатау и Тувы ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) \approx$ от $+1,5$ до $+5,5$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) \approx 0,705$ – $0,707$) в целом подобен ранним производным, то породы Западного Забайкалья нередко обогащены радиогенным стронцием ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) \approx$ до $0,707$ – $0,714$) и менее деплетированы по соотношению $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) \approx$ от $+1$ до $-9,5$) (рис. 3, а). В мезозойских вулканоплутонических ассоциациях наблюдается корреляция между значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ ($\sim 0,7033$ – $0,7096$) и $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($\sim$ от $+6$ до $-10,5$). Масштабы их вариаций наиболее сопоставимы с изотопными параметрами продуктов палеозойского магматизма (рис. 3, б).

Роль источников вещества и мантийно-коровое взаимодействие в эволюции щелочного и карбонатитового магматизма

Характер изотопной неоднородности щелочных пород и карбонатитов в складчато-глыбовых областях свидетельствует об изначально мантийной природе родительских магм. Вместе с тем генерация расплавов и их эволюция могла происходить как при смешении различного сублитосферного вещества, так и при взаимодействии первичных магм с литосферным субстратом.

Мантийные резервуары. Согласно изотопным Nd–Sr данным, наиболее гомогенный магматический источник имеют позднедокембрийские комплексы Восточного Саяна, Енисейского кряжа и Северного Забайкалья (рис. 3, а). Как и в подобных породах Восточно-Европейского, Сибирского, Таримского, Северо-Американского кратонов и их обрамления [Bell, 1989; Kramm, Kogarko, 1994; Когарко и др., 1999; Morikiyo et al., 2001; Dunworth, Bell, 2001; Brassinnes et al., 2003; Владыкин, 2005; Lee et al., 2006; Cheng et al., 2017; Wang et al., 2021; Nedosekova et al., 2021], преобладающее в нем вещество сопоставимо с умеренно деплетированной мантией PREMA/FOZO или HIMU-типа и содержит незначительную примесь более обогащенного субстрата, сходного с BSE (Bulk Silicate Earth) или EM1. Более широкие вариации $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ в изверженных породах палеозойских ассоциаций Алтае-Саянского региона и Западного Забайкалья позволяют предпола-

гать, что наряду с производными этих мантийных доменов в расплавах возрастает доля вещества ЕМ-типа. Для изотопного состава Nd мезозойских ком-

плексов сохраняется аналогичная зависимость, но уже с доминантой материала обогащенной мантии (рис. 3, б).

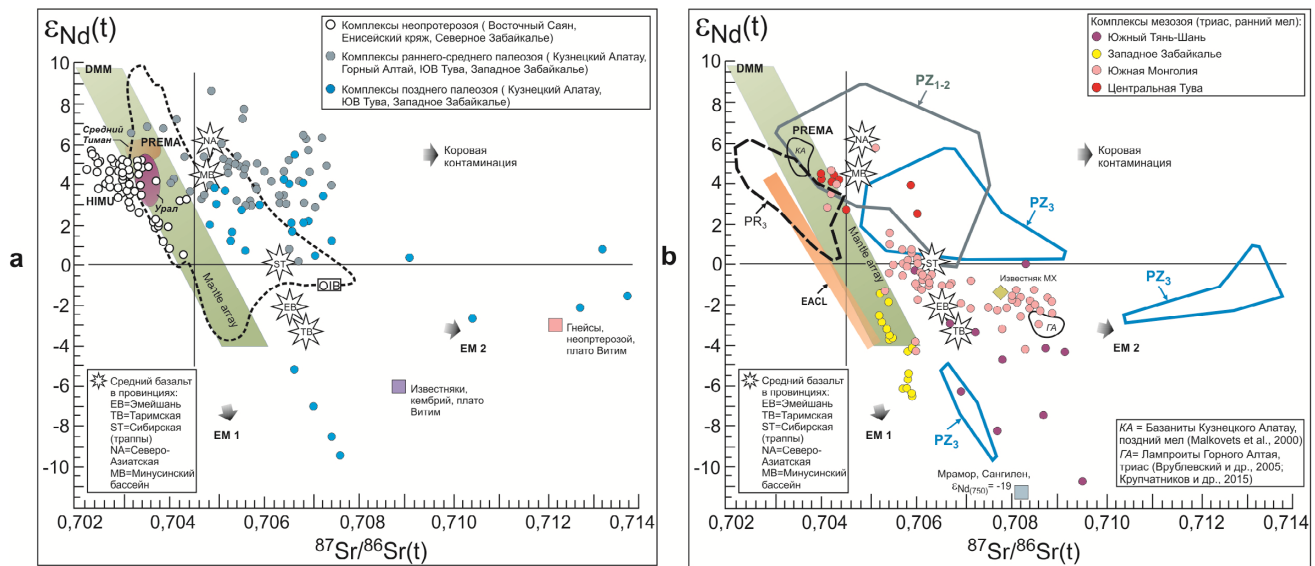


Рис. 3. Изотопный состав неодиума и стронция изверженных щелочных пород и карбонатитов докембрия и палеозоя (а), мезозоя (б) в складчатых областях Северной и Западной Азии

а – неопротерозой: Енисейский кряж, Восточный Саян, Северное Забайкалье [Врублевский и др., 2003б; Владыкин, 2005; Сазонов и др., 2007; Дорошкевич, 2013; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019; Хромова и др., 2020]. Палеозой: Кузнецкий Алатау, Горный Алтай, ЮВ Тува (Сангилен), Западное Забайкалье [Врублевский и др., 2012, 2015, 2018а, 2019; Врублевский, Гертнер, 2021; Doroshkevich et al., 2012; Vrublevskii et al., 2020, 2021; Izbrodin et al., 2020; Nikiforov et al., 2021]. **б** – мезозой: Западное Забайкалье, Центральная Тува, Южная Монголия (Мушугай-Худук, Баян-Хушу, Улугей-Хид, Лугин-Гол), Южный Тянь-Шань [Никифоров и др. 2002, 2006; Владыкин, 2005; Дорошкевич, Рипп, 2009; Baatar et al., 2013; Vrublevskii et al., 2018; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019; Nikolenko et al., 2020]. EACL (East Africa carbonatite line) = меловые и кайнозойские карбонатиты Восточно-Африканского рифта [Bell, 1989]; OIB = базальты океанских островов [Zindler, Hart, 1986; White, 2010]. Составы базальтов Эмейшаньской, Таримской и Сибирской провинций, Северо-Азиатского плюма и Минусинского девонского рифта, по [Lightfoot et al., 1993; Ярмолюк, Коваленко, 2003; Zhang et al., 2010; Li et al., 2012, 2015; Воронцов и др., 2013; Wei et al., 2014]; щелочных пород и карбонатитов Ильмено-Витимского и четлаасского комплексов Урала и Среднего Тимана, по [Nedosekova et al., 2013, 2021]; известняков и гнейсов Витимского плато, по [Дорошкевич, 2013]; мраморов по [Врублевский и др., 2019]; вмещающего известняка Мушугай-Худука (MX), по [Nikolenko et al., 2020]. Область «Mantle array», современные резервуары DMM (MORB), PREMA, HIMU, EM 1 и EM 2, по [Zindler, Hart, 1986; Stracke et al., 2005]. Применялись стандарты La Jolla (для Nd) и SRM-987 (для Sr)

Fig. 3. Nd and Sr isotopic compositions of the Neoproterozoic and Paleozoic (a), Mesozoic (b) alkaline silicate rocks and carbonatites in the folded areas of North and West Asia

а – Neoproterozoic: Yenisei Ridge, Eastern Sayan, North Transbaikalia [Vrublevskii et al., 2003b; Vladyskin, 2005; Sazonov et al., 2007; Doroshkevich, 2013; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019; Khromova et al., 2020]. Paleozoic: Kuznetsk Alatau, Gorny Altai, SE Tuva (Sangilen), West Transbaikalia [Vrublevskii et al., 2012, 2015, 2018a, 2019; Vrublevskii, Gertner, 2021; Doroshkevich et al., 2012; Vrublevskii et al., 2020, 2021; Izbrodin et al., 2020; Nikiforov et al., 2021]. **б** – Mesozoic: West Transbaikalia, Central Tuva, South Mongolia (Mushugai-Khuduk, Bayan-Khushu, Ulugei-Khid, Lugin-Gol), Southern Tien Shan [Nikiforov et al., 2002, 2006; Vladyskin, 2005; Doroshkevich, Ripp, 2009; Baatar et al., 2013; Vrublevskii et al., 2018; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019; Nikolenko et al., 2020]. EACL (East Africa carbonatite line) = Cretaceous and Cenozoic carbonatites of the East African Rift [Bell, 1989]; OIB = basalts of oceanic islands [Zindler, Hart, 1986; White, 2010]. The basalt compositions of the Emeishan, Tarim and Siberian provinces, the North Asian plume and the Minusinsk Devonian rift after [Lightfoot et al., 1993; Yarmolyuk, Kovalenko, 2003; Zhang et al., 2010; Li et al., 2012, 2015; Vorontsov et al., 2013; Wei et al., 2014]; alkaline rocks and carbonatites of the Ilmeno-Vishnevogorsk and Chetlaskii complexes of the Urals and Timan after [Nedosekova et al., 2013, 2021]; limestones and gneisses of the Vitim plateau after [Doroshkevich, 2013]; marble after [Vrublevskii et al., 2019]; the host limestone Mushugai-Khuduk (MH) after [Nikolenko et al., 2020]. Mantle array, modern DMM (MORB), PREMA, HIMU, EM 1 and EM 2 mantle components after [Zindler, Hart, 1986; Stracke et al., 2005]. La Jolla (for Nd) and SRM-987 (for Sr) standards were applied

Как видно, развитие разновозрастного магматизма происходит при участии глубинного вещества наподобие источников базальтовых расплавов мантийной последовательности. Эта взаимосвязь особенно отчетливо прослеживается для палеозойских

щелочно-основных/ультраосновных пород и карбонатитов Кузнецкого Алатау, Горного Алтая, ЮВ Тувы, Западного Забайкалья и Южного Урала, а также для некоторых мезозойских карбонатитосодержащих комплексов Южной Монголии, в которых

изотопные отношения Nd и Sr частично совпадают с параметрами базальтов океанских островов (см. рис. 3). Установленная закономерность является характерной чертой состава многих разновозрастных, в том числе докембрийских, карбонатитовых комплексов, на основании чего утверждается их происхождение из сублитосферных мантийных (плюмовых) источников FOZO, HIMU и EM1 [Bell, Simonetti, 2010]. По-видимому, транспорт таких компонентов, как и сама инициация ОИВ-вулканизма, дол-

жен был осуществляться через систему горячей точки – «мантийной струи». Учитывая изотопно-геохимическое сходство рассмотренных магматических ассоциаций с производными ОИВ-типа, модель с участием мантийного плюма в их формировании выглядит предпочтительной и косвенно подтверждается наличием изотопной зависимости между составами щелочных пород и карбонатитов палеозоя–мезозоя и плюмовыми базальтами крупных изверженных провинций (рис. 3).

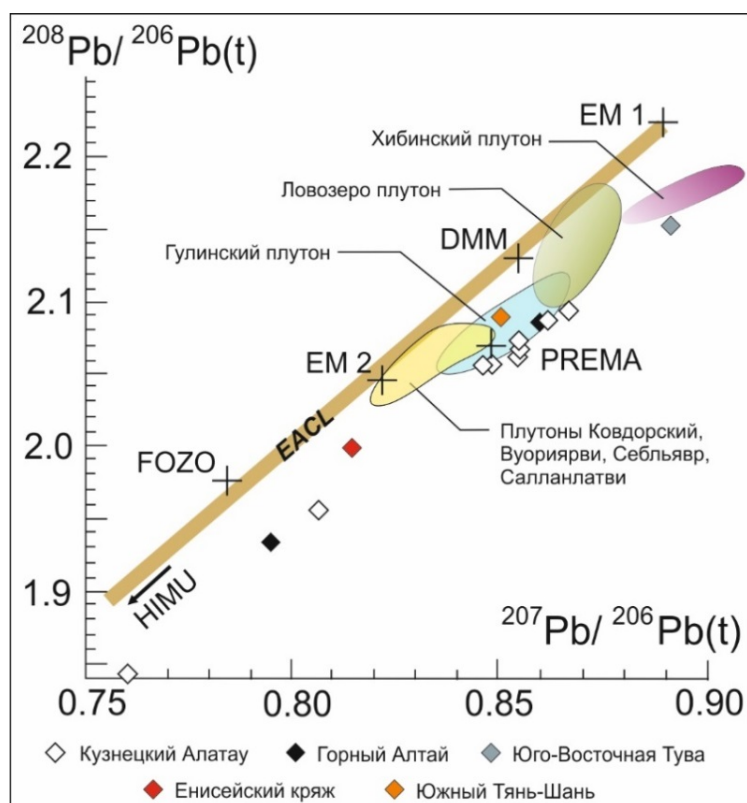


Рис. 4. Изотопный состав свинца в минералах (микроклин, пирротин, пирит) и породах щелочных и карбонатитовых комплексов

Данные по щелочным породам и карбонатитам Кузнецкого Алатау, Горного Алтая, Юго-Восточной Тувы, Южного Тянь-Шаня и Енисейского кряжа по [Врублевский, Гертнер, 2021; Vrublevskii et al., 2018, 2019b]. Мантийные компоненты (современные изотопные резервуары): PREMA (преобладающая мантия), FOZO (мантия фокусной зоны), HIMU (мантия с высоким значением μ), DMM (деплетированная MORB мантия), EM1 (обогащенная мантия 1) и EM2 (обогащенная мантия 2), по [Zindler, Hart, 1986; Hart et al., 1992; Stracke et al., 2005]. Допускается возможное сходство изотопных параметров разновозрастных мантийных субстратов. EACL – East African Carbonatite Line, по [Bell, Tilton, 2001]. Составы щелочных пород и карбонатитов Европейского (Ловозерский, Хибинский, Ковдорский массивы) и Сибирского (Гулинский массив) кратонов, по [Когарко, Зартман, 2011; Зартман, Когарко, 2014; Lee et al., 2006]; галенита из карбонатитов Кольской провинции (массивы Себляяр, Салланлатви, Вуориярви, Ковдор), по [Bell et al., 2015]

Fig. 4. Pb isotopic composition in minerals (microcline, pyrrhotite, pyrite) and rocks of alkaline and carbonatite complexes

Alkaline rocks and carbonatites data of the Kuznetsk Alatau, Gornyy Altai, SE Tuva, Southern Tien Shan and Yenisei Ridge after [Vrublevsky, Gertner, 2021; Vrublevskii et al., 2018, 2019b]. Mantle components (modern isotope reservoirs): PREMA (dominant mantle), FOZO (focal zone mantle), HIMU (high μ mantle), DMM (depleted MORB mantle), EM1 (enriched mantle 1), and EM2 (enriched mantle 2) according to [Zindler, Hart, 1986; Hart et al., 1992; Stracke et al., 2005]. Similarity of isotopic parameters for different-aged mantle sources is possible. EACL - East African Carbonatite Line after [Bell, Tilton, 2001]. Pb isotopic compositions of the alkaline rocks and carbonatites from European (Lovozerovo, Khiby, Kovdor) and Siberian (Guli) cratons [Kogarko, Zartman, 2011; Zartman, Kogarko, 2014; Lee et al., 2006] and carbonatites of the Kola province (Sebyayr, Sallanlatvi, Vuoriyarvi, Kovdor) [Bell et al., 2015] are shown for comparison

Наряду с вариациями изотопов Nd и Sr, на возможное смещение вещества сублитосферных расплавов указывает измеренный нами изотопный состав свинца в щелочных породах и карбонатитах [Врублевский, Гертнер, 2021; Vrublevskii et al., 2018, 2019b, 2020]. Его значения образуют тренд, аналогичный общеизвестной «карбонатитовой линии» Восточно-Африканского рифта (EACL), демонстрирующей гетерогенность мантийных источников для сближенных в пространстве меловых и кайнозойских вулканоплутонов (см. рис. 4). Сопоставимые первичные изотопные отношения Pb характерны для карбонатитосодержащих щелочных плутонов Европейского и Сибирского кратонов, образование которых также связывают с плюмовой активностью [Lee et al., 2006; Когарко, Зартман, 2011; Зартман, Когарко, 2014; Bell et al., 2015].

Процессы генерации и подъема мантийных карбонатитовых и карбонатизированных щелочных магм являются важным звеном в планетарном глубинном углеродном цикле (deep carbon cycle) [Добрецов, Шацкий, 2012; Yaxley et al., 2020]. По современным данным мантийные карбонаты имеют относительно «легкий» изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C} \approx$ от -7 до -3 ‰ [Deines, 2002; Tappe et al., 2008; Giuliani et al., 2014]. Сходными значениями обладают первичные магматические карбонаты, которые содержат глубинную углекислоту с $\delta^{13}\text{C}$ от -8 до -4 ‰ и $\delta^{18}\text{O}$ $6-10$ ‰ [Conway, Taylor, 1969; Keller, Hoefs, 1995]. В обсуждаемых ассоциациях только карбонаты докембрийских пород вполне соответствуют этому критерию, а наблюдаемые в их составе вариации могут быть вызваны рэлеевским изотопным фракционированием или незначительной коровой контаминацией расплавов (см. рис. 2). В большинстве породообразующих карбонатов из более молодых магматических центров значения $\delta^{18}\text{O}$ заметно выше (до $\sim 12-23$ ‰), что не позволяет отождествлять их только с мантийными производными.

Коровая контаминация расплавов и поздне-/постмагматические эффекты. Как уже отмечалось, неоднородность изотопных составов Nd и Sr в изученных комплексах можно интерпретировать как результат смешения вещества различных мантийных субстратов. Однако высокие значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ ($>0,706$) во многих палеозойских и мезозойских изверженных породах свидетельствуют о контаминации первичных расплавов радиогенным ^{87}Sr в верхних частях литосферы. Наблюдаемая корреляция между изотопными отношениями $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в углекислоте карбонатов также указывает на вероятное участие разнородного вещества в их генезисе, что позволяет выделять своеобразные мантино-коровые карбонатиты с параметрами ($\delta^{13}\text{C}$ $-7,5$ до $-1,5$ ‰ и $\delta^{18}\text{O}$ $12-18$ ‰) (рис. 2, а).

По сравнению с мантийным интервалом ($\delta^{18}\text{O} = 5,5 \pm 0,5$ ‰) [Taylor, Sheppard, 1986], более тяжелым изотопным составом кислорода обладают многие породообразующие силикаты, апатит, иногда магнетит ($\delta^{18}\text{O} \sim 7-17$ ‰). За исключением редких инверсированных парагенезисов значения $\delta^{18}\text{O}$ соответствуют изотопно-равновесному фракционированию между ассоциирующими минералами и их способности накапливать ^{18}O в кристаллической решетке [Врублевский и др., 2012, 2015; Doroshkevich et al., 2012; Vrublevskii et al., 2018, 2020]. Предполагается, что в этом случае поступление корового компонента происходило непосредственно в расплав [Врублевский, Гертнер, 2021]. Одновременное увеличение значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$, $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ (до $\sim +5-13$ ‰), а также признаки смешения углекислоты осадочного происхождения с изотопно-легкой ювенильной CO_2 в породах палеозойских и мезозойских изверженных комплексах западной части ЦАСП вполне согласуются с моделью коровой контаминации фракционированных мантийных магм. Мы допускаем вероятность подобного процесса с учетом эволюции щелочного магматизма в аккреционно-коллизийных террейнах раннего палеозоя ЦАСП.

Изменение состава изотопов C и O в карбонатах мезозойских и, частично, палеозойских комплексов согласуется с моделью взаимодействия породы и магматогенного водного (карботермального) флюида при различном соотношении флюид/порода и широком диапазоне концентраций XCO_2 в растворе (рис. 2). При этом наиболее высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ могут быть обусловлены влиянием поздних низкотемпературных гидротерм. В карбонатитах и щелочных породах приразломных зон (фенит-карбонатитовая ассоциация на Енисейском кряже, Белозиминский ультраосновной массив в Восточном Саяне) [Врублевский и др., 2003б; Doroshkevich et al., 2016; Vrublevskii et al., 2019b] и субвулканических обстановок (комплексы халютинский и аршанский в Западное Забайкалье, Мушугай-Худук в Южной Монголии) [Никифоров и др., 2000, 2002; Doroshkevich et al., 2008; Nikolenko et al., 2020] также наблюдается нарушение изотопного равновесия между минералами под воздействием нагретых метеорных вод. Инверсия состава отчетливо фиксируется в виде пониженных значений δD и $\delta^{18}\text{O}$ в сосуществующих флогопите и амфиболе ($\delta\text{D} \sim$ от -150 до -60 ‰; $\delta^{18}\text{O} \sim 3-7$ ‰), магнетите и пироклоре ($\delta^{18}\text{O} \sim$ от -7 до $+1,5$ ‰). Однако на примере щелочных комплексов эдельвейс в Горном Алтае и матчайский в Южном Тянь-Шане видно, что происшедшая коровая контаминация расплавов не повлияла на характер фракционирования водорода и дейтерия в породообразующих слюдах и амфиболах (δD от -85 до -41 ‰ при значениях $\delta^{18}\text{O} \sim 8-16$ ‰) [Врублевский и др., 2012; Vrublevskii et al., 2018].

В сходном диапазоне (δD от -90 до -40 ‰) обычно варьирует состав флогопита мантийных ксенолитов и кимберлитов, «нормально-магматической» воды в свежих стеклах MORB [Покровский, 2000].

Особенности геодинамических обстановок магматизма. На основании выявленных геохимических особенностей предполагается, что первичным источником вещества рассмотренных вулканоплутонических комплексов являлась сублитосферная мантия. По-видимому, в периоды плюмовой активности происходило смешение материала ее отдельных доменов PREMA/FOZO, HIMU и EM 1, что привело к формированию изотопно-неоднородных ассоциаций пород с различным соотношением мантийных компонентов. В производных неопротерозойского щелочного и карбонатитового магматизма Енисейского кряжа, Восточного Саяна и Северного Забайкалья, связанных с глубоко проникающими рифтогенными разломами на окраине Сибирского палеоконтинента, преобладает вещество умеренно деплетированной мантии. Как известно, сходную плюмовую природу имеют аналогичные магматические проявления на докембрийских кратонах.

Изотопные особенности пород в центрах палеозойского и мезозойского щелочного магматизма ЦАСП свидетельствуют о том, что в своем развитии сублитосферные расплавы взаимодействуют с различными литосферными субстратами [Doroshkevich et al., 2012; Дорошкевич и др., 2018; Nikiforov, Yarmolyuk, 2019; Izbrodin et al., 2020; Врублевский, Гертнер, 2021]. Подобное смешение может происходить в обстановке активной континентальной окраины, где дополнительными факторами являются дегидратация слэба и плавление надсубдукционного мантийного клина [Добрецов, 2010; Ярмолук и др., 2013; Martynov et al., 2017; Kimura et al., 2018; Гордиенко, 2019].

Согласно модели каледонид ЦАСП [Yarmolyuk et al., 2014], для палеозойских комплексов Кузнецкого Алатау, Горного Алтая и ЮВ Тувы нами допускается вероятность взаимодействия мантийного плюма с материалом ранее сформировавшихся раннекембрийских аккреционных комплексов [Врублевский и др., 2012, 2014, 2018б, 2019; Врублевский, Гертнер, 2021; Vrublevskii et al., 2020, 2021]. Наряду с верхнекоровыми компонентами, в составе пород мезозоя и, частично, позднего палеозоя доминирует уже вещество литосферной мантии, метасоматизированной плюмовыми расплавами и слэб-флюидами [Nikolenko et al., 2020]. Таким образом, для развития внутриплитного магматизма складчатых областей в позднем палеозое-мезозое можно предположить очаговое переплавление литосферного субстрата под действием локальных «фингер-плюмов». Вариации изотопов Nd и Sr, скорее всего, отражают разную степень гибридности и коровой контаминации глубинных расплавов.

Выводы

1. Формирование неопротерозойских, палеозойских и мезозойских комплексов щелочных пород и карбонатитов в складчатых областях Северной и Западной Азии могло происходить при смешении вещества из различных магматических источников. Вариации изотопного состава Nd, Sr и Pb первичных расплавов обусловлены взаимодействием материала умеренно деплетированного (PREMA/FOZO, HIMU) и обогащенного (ЕМ) доменов сублитосферной мантии. Степень участия ЕМ-компонента заметно возрастает в производных позднепалеозойского и мезозойского магматизма. Согласно плюмовой модели, это исключает существование строго изолированных изотопно-гомогенных мантийных резервуаров, самостоятельно продуцирующих карбонатитовые и CO_2 -насыщенные щелочные силикатные расплавы.

2. Подъем первичных глубинных магм может сопровождаться их взаимодействием с субстратом метасоматизированной литосферной мантии и образованием гибридных расплавов. Одновременное обогащение щелочных пород и карбонатитов радиогенным ^{87}Sr и тяжелыми изотопами O, C и S свидетельствует о вероятной верхнекоровой контаминации. По соотношению $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в породообразующем карбонате выделяется группа мантийно-коровых карбонатитов. Однако влияние на состав минерала дополнительно процессов высокотемпературного рэлеевского фракционирования солевого расплава, магматогенных и метеорных флюидов, низкотемпературных гидротерм не позволяет определить конкретный доменный источник в деплетированной или обогащенной мантии.

3. Геодинамические обстановки щелочного и карбонатитового магматизма складчатых областей отражают общий стиль различных эпох тектогенеза. В позднем докембрии внедрение плюмовых магм контролировалось глубоко проникающими рифтинговыми структурами, связанными с расколом суперконтинента Родинии. На палеозойском этапе развития Палеоазиатского океана и формирования аккреционно-коллизонных комплексов ЦАСП магматизм проявляется в условиях вероятной суперпозиции мантийного плюма и бывшей активной окраины континента. В мезозое плюмовая активность приводила к плавлению литосферной мантии и образованию очагов гибридных магм. Скорее всего, подъем подобных расплавов осуществлялся благодаря рифтогенным процессам, которые происходили на более мощной континентальной коре и не достигали сублитосферного уровня.

Рукопись подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания НИ ТГУ (проект 0721–2020–0041), Государственного задания ИГМ СО РАН и ГИН СО РАН (проекты 0330–2016–0002, АААА–А16–116122110027–2).

ЛИТЕРАТУРА

- Баскина В.А., Волчанская И.К., Фрих-Хар Д.И., Ярмолюк В.В.** Провинция калиевых щелочно-основных и щелочных вулканитов Южной Монголии // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1977. № 10. С. 88–106.
- Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Котов А.Б., Ковач В.П., Верниковская И.В., Матушкин Н.Ю., Ясенов А.М.** Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона: результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // Доклады Академии наук. 2008. Т. 419 (1). С. 90–94.
- Владыкин Н.В.** Геохимия изотопов Sr и Nd щелочных и карбонатитовых комплексов Сибири и Монголии и некоторые геодинамические следствия // Проблемы источников глубинного магматизма и плюмы. Иркутск : Институт географии СО РАН, 2005. С. 13–29.
- Воронцов А.А., Федосеев Г.С., Андрищенко С.В.** Девонский вулканизм Минусинского прогиба Алтае-Саянской области: геологические, геохимические и изотопные Sr–Nd характеристики пород // Геология и геофизика. 2013. Т. 54 (9). С. 1283–1313.
- Врублевский В.В.** Источники и геодинамические условия петрогенезиса Верхнепетропавловского щелочно-базитового интрузивного массива (средний кембрий, Кузнецкий Алатау, Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56 (3). С. 488–515.
- Врублевский В.В., Войтенко Н.Н., Романов А.П., Поляков Г.В., Изох А.Э., Гертнер И.Ф., Крупчатников В.И.** Источники магм триасовых лампроитов Горного Алтая и Таймыра: (Sr, Nd)-изотопные свидетельства плюм-литосферного взаимодействия // Доклады Академии наук. 2005. Т. 405 (5). С. 658–660.
- Врублевский В.В., Гертнер И.Ф.** Палеозойские щелочно-мафитовые интрузии Кузнецкого Алатау, их источники и условия образования расплавов // Петрология. 2021. Т. 29 (1). С. 31–63.
- Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Гутierrez-Алонсо Г., Хофманн М., Гринев О.М., Тишин П.А.** Изотопная (U–Pb, Sm–Nd, Rb–Sr) геохронология щелочно-базитовых плутонов Кузнецкого Алатау // Геология и геофизика. 2014. Т. 55 (11). С. 1598–1614.
- Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Журавлев Д.З., Макаренко Н.А.** Sm–Nd-изотопный возраст и природа источника ассоциации щелочных основных пород и карбонатитов Кузнецкого Алатау // Доклады Академии наук. 2003а. Т. 391 (3). С. 378–382.
- Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Поляков Г.В., Изох А.Э., Крупчатников В.И., Травин А.В., Войтенко Н.Н.** Ar–Ar-изотопный возраст лампроитовых даек чуйского комплекса, Горный Алтай // Доклады Академии наук. 2004. Т. 399 (4). С. 516–519.
- Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Чугаев А.В.** Источники вещества высокоглиноземистых щелочных магм по данным изотопной (Nd, Sr, Pb, O) геохимии пород Кыя-Шалтырского габбро-уртитового интрузива девонского возраста, Южная Сибирь // Доклады Академии наук. 2018а. Т. 479 (6). С. 666–672.
- Врублевский В.В., Гринев О.М., Изох А.Э., Травин А.В.** Геохимия, изотопная (Nd–Sr–O) триада и ^{40}Ar – ^{39}Ar возраст палеозойских щелочно-мафитовых интрузий Кузнецкого Алатау (на примере Белогорского плутона) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57 (3). С. 592–602.
- Врублевский В.В., Изох А.Э., Поляков Г.В., Гертнер И.Ф., Юдин Д.С., Крупчатников В.И.** Раннепалеозойский щелочной магматизм Горного Алтая: ^{40}Ar – ^{39}Ar -геохронологическое свидетельство комплекса эдельвейс // Доклады Академии наук. 2009. Т. 427 (1). С. 96–100.
- Врублевский В.В., Котельников А.Д., Изох А.Э.** Возраст, петрологические и геохимические условия формирования когтахаского габбро-монцонитового комплекса Кузнецкого Алатау // Геология и геофизика. 2018б. Т. 59 (7). С. 900–930.
- Врублевский В.В., Крупчатников В.И., Изох А.Э., Гертнер И.Ф.** Щелочные породы и карбонатиты Горного Алтая (комплекс эдельвейс): индикатор раннепалеозойского плюмового магматизма в Центрально-Азиатском складчатом поясе // Геология и геофизика. 2012. Т. 53 (8). С. 945–963.
- Врублевский В.В., Никифоров А.В., Сугоракова А.М., Козулина Т.В.** Мантийно-коровая природа раннепалеозойских щелочных интрузий Центрального Сангилен, Тува (по Nd, Sr, Pb, C, O изотопным данным) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60 (5). С. 591–605.
- Врублевский В.В., Покровский Б.Г., Журавлев Д.З., Аношин Г.Н.** Вещественный состав и возраст пенчугинского линейного комплекса карбонатитов, Енисейский край // Петрология. 2003б. Т. 11 (2). С. 145–163.
- Врублевский В.В., Ревердатто В.В., Изох А.Э., Гертнер И.Ф., Юдин Д.С., Тишин П.А.** Неопротерозойский карбонатитовый магматизм Енисейского края, Центральная Сибирь: ^{40}Ar – ^{39}Ar геохронология пенчугинского комплекса // Доклады Академии наук. 2011. Т. 437 (4). С. 514–519.
- Гордиенко И.В.** Связь субдукционного и плюмового магматизма на активных границах литосферных плит в зоне взаимодействия Сибирского континента и Палеоазиатского океана в неопротерозое и палеозое // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10 (2). С. 405–457.
- Добрецов Н.Л.** Петрологические, геохимические и геодинамические особенности субдукционного магматизма // Петрология. 2010. Т. 18 (1). С. 88–110.
- Добрецов Н.Л., Шацкий А.Ф.** Глубинный цикл углерода и глубинная геодинамика: роль ядра и карбонатитовых расплавов в нижней мантии // Геология и геофизика. 2012. Т. 53 (11). С. 1455–1475.
- Дорошкевич А.Г.** Петрология карбонатитовых и карбонатитосодержащих щелочных комплексов Западного Забайкалья : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Улан-Удэ, 2013. 31 с.
- Дорошкевич А.Г., Избродин И.А., Рампилов М.О., Рипп Г.С., Ласточкин Е.И., Хубанов В.Б.** Пермотриасовый этап щелочного магматизма Витимского плоскогорья (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59 (9). С. 1325–1344.
- Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С.** Изотопная характеристика пород халютинского карбонатитового комплекса (Западное Забайкалье) // Геохимия. 2009. № 12. С. 1279–1293.
- Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С., Владыкин Н.В., Саватенков В.М.** Источники карбонатитового магматизма Северного Забайкалья в позднем рифее: геохимические и изотопно-геохимические данные // Геохимия. 2011. № 12. С. 1271–1283.
- Дорошкевич А.Г., Рипп Г.С., Избродин И.А., Сергеев С.А., Травин А.В.** Геохронология Гулхенского массива Витимской щелочной провинции, Западное Забайкалье // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457 (6). С. 687–691.
- Зартман Р.Э., Когарко Л.Н.** Изотопный состав свинца агпайтовых нефелиновых сиенитов и редкометальных руд Ловозерского массива (Кольский полуостров, Россия) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 454 (1). С. 77–80.

- Избродин И.А., Дорошкевич А.Г., Рампилов М.О., Рипп Г.С., Ласточкин Е.И., Хубанов В.Б., Посохов В.Ф., Владыкин Н.В.** Возраст, минералогическая и геохимическая характеристики пород Чининского щелочного массива (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58 (8). С. 1135–1156
- Когарко Л.Н., Фоланд К., Хендерсон М.** Эволюция и изотопные источники Гулинского ультраосновного-щелочного массива (Полярная Сибирь) // Доклады Академии наук. 1999. Т. 364 (2). С. 235–237.
- Когарко Л.Н., Зартман Р.Э.** Новые данные о возрасте Гулинской интрузии и проблема связи щелочного магматизма Маймеча-Котуйской провинции с Сибирским суперплумом (данные по изотопии U-Th-Pb системы) // Геохимия. 2011. № 5. С. 462–472.
- Крупчатников В.И., Врублевский В.В., Крук Н.Н.** Раннемезозойские лампроиты и монцонитоиды юго-востока Горного Алтая: геохимия, Sr–Nd изотопный состав, источники расплавов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56 (6). С. 1057–1079.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.** Мантийные плюмы северо-восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика. 2014. Т. 55 (2). С. 153–184.
- Кулешов В.Н.** Изотопный состав и происхождение глубинных карбонатов. М.: Наука, 1986. 124 с.
- Кулешов В.Н., Первов В.А.** Изотопный состав углерода и кислорода апатит-кальцитовых пород района Улугей-Хид (Южная Монголия) // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1982. № 10. С. 44–51.
- Лапин А.В., Плоско В.В., Малышев А.А.** Карбонатиты зоны Татарского глубинного разлома на Енисейском кряже // Геология рудных месторождений. 1987. № 1. С. 30–45.
- Никифоров А.В., Болонин А.В., Покровский Б.Г., Сугоракова А.М., Чугаев А.В., Лыхин Д.А.** Геохимия изотопов (О, С, S, Sr) и Rb–Sr-возраст карбонатитов Центральной Тувы // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48 (4). С. 296–319.
- Никифоров А.В., Сальникова Е.Б., Ярмолюк В.В., Котов А.Б., Сугоракова А.М., Анисимова И.В.** Раннепермский возраст нефелиновых сиенитов Коргоретабинского массива (Сангиленское нагорье, Тува) // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485 (2). С. 194–197.
- Никифоров А.В., Ярмолюк В.В.** Раннепалеозойский возраст формирования и геодинамическое положение Ботогольского и Хушагольского массивов щелочных пород Центрально-Азиатского складчатого пояса // Доклады Академии наук. 2007. Т. 412 (1). С. 81–86
- Никифоров А.В., Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г., Журавлев Д.З.** Позднемезозойские карбонатиты Западного Забайкалья: изотопно-геохимические характеристики и источники // Петрология. 2002. Т. 10 (2). С. 168–188.
- Никифоров А.В., Ярмолюк В.В., Покровский Б.Г., Коваленко В.И., Иванов В.Г., Андреева И.А., Журавлев Д.З., Рипп Г.С., Владыкин Н.В., Коршунов В.В.** Позднемезозойские карбонатиты Западного Забайкалья: минеральный, химический и изотопный (О, С, S, Sr) состав и соотношения со щелочным магматизмом // Петрология. 2000. Т. 8 (3). С. 309–336
- Ножкин А.Д., Туркина О.М., Баянова Т.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Постников А.А., Травин А.В., Эрнст Р.Е.** Неопротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм Енисейского кряжа как индикатор процессов распада Родинии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49 (7). С. 666–688.
- Покровский Б.Г.** Коровая контаминация мантийных магм по данным изотопной геохимии. М.: Наука, 2000. 228 с.
- Покровский Б.Г., Андреева Е.Д., Врублевский В.В., Гринев О.М.** Природа контаминации щелочно-габброидных интрузий южного обрамления Сибирской платформы по данным изотопии стронция и кислорода // Петрология. 1998. Т. 6 (3). С. 259–273.
- Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г., Посохов В.Ф.** Возраст карбонатитового магматизма Забайкалья // Петрология. 2009. Т. 17 (1). С. 79–96.
- Сазонов А.М., Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Федорова А.В., Гавриленко В.В., Звягина Е.А., Леонтьев С.И.** Заангарский щелочной интрузив, Енисейский кряж: Rb–Sr-, Sm–Nd-изотопный возраст пород и источники фельдшпатоидных магм в позднем докембрии // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413 (6). С. 798–802.
- Сальникова Е.Б., Стифеева М.В., Никифоров А.В., Ярмолюк В.В., Котов А.Б., Анисимова И.В., Сугоракова А.М., Врублевский В.В.** Гранаты ряда андрадит-морimotoит – потенциальные минералы-геохронометры для U–Pb датирования ультраосновных щелочных пород // Доклады Академии наук. 2018. Т. 480 (5). С. 583–586.
- Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Никифоров А.В., Котов А.Б., Ярмолюк В.В., Анисимова И.В., Сугоракова А.М., Плоткина Ю.В.** Бастнезит: перспективный минерал-геохронометр для U–Pb-геохронологических исследований // Доклады Академии наук. 2010. Т. 430 (3). С. 386–388.
- Свешникова Е.В., Семенов Е.И., Хомяков А.М.** Заангарский щелочной массив, его породы и минералы. М.: Наука, 1976. 80 с.
- Фролов А.А., Толстов А.Р., Белов С.В.** Карбонатитовые месторождения России. М.: НИИ Природа, 2003. 287 с.
- Хромова Е.А., Дорошкевич А.Г., Избродин И.А.** Геохимическая и Sr–Nd–Pb изотопная характеристики щелочных пород и карбонатитов Белозиминского массива (Восточный Саян) // Геосферные исследования. 2020. № 1. С. 33–55.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И.** Глубинная геодинамика, мантийные плюмы и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология. 2003. Т. 11 (6). С. 556–586.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В.** Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 2005. Т. 404 (3). С. 400–406.
- Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И., Воронцов А.А.** Конвергентные границы западно-тихоокеанского типа и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2013. Т. 54 (12). С. 1831–1850.
- Яшина Р.М.** Щелочной магматизм складчато-глыбовых областей (на примере южного обрамления Сибирской платформы). М.: Наука, 1982. 274 с.
- Baatar M., Ochir G., Kynicky J., Iizumi S., Comin-Chiaramonti P.** Some notes on the Lugin Gol, Mushgai Khudag, and Bayan Khoshuu alkaline complexes, southern Mongolia // International Journal of Geosciences. 2013. V. 4. P. 1200–1214.
- Bell K.** Carbonatites: Genesis and Evolution (Ed.). London: Unwin-Hyman, 1989. 610 p.
- Bell K., Kjarsgaard B.A., Simonetti A.** Carbonatites – into the twenty-first century (Preface) // Journal of Petrology. 1998. V. 39 (11/12). P. 1839–1845.
- Bell K., Simonetti A.** Source of parental melts to carbonatites – critical isotopic constraints // Mineralogy and Petrology. 2010. V. 98. P. 77–89.
- Bell K., Tilton G.R.** Nd, Pb and Sr isotopic compositions of East African carbonatites: evidence for mantle mixing and plume inhomogeneity // Journal of Petrology. 2001. V. 42. P. 1927–1945.

- Bell K., Zaitsev A.N., Spratt J., Frojdo S., Rukhlov A.S.** Elemental, lead and sulfur isotopic compositions of galena from Kola carbonatites, Russia – implications for melt and mantle evolution // *Mineralogical Magazine*. 2015. V. 79 (2). P. 219–241.
- Blichert-Toft J., Albarede F.** The Lu–Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system // *Earth and Planetary Science Letters*. 1997. V. 148. P. 243–258.
- 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 and Planetary Science Letters*. 2008. V. 273. P. 48–57.
- Bowman J.R.** Stable-isotope systematics in skarns // In: *Mineralized intrusion-related skarn systems* (ed. D.R. Lentz). Mineralogical Association of Canada Short Course. 1998. V. 26. P. 1–49.
- Brassinnes S., Demaiffe D., Balaganskaya E., Downes H.** New mineralogical and geochemical data on the Vuorijarvi ultramafic, alkaline and carbonatitic complex (Kola Region, NW Russia) // *Periodico di Mineralogia*. 2003. V. 72. P. 79–86.
- Chauvel C., Lewin E., Carpentier M., Arndt N.T., Marini J-C.** Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf–Nd mantle array // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. P. 64–67.
- Chauvel C., Blichert-Toft J.** A hafnium isotope and trace element perspective on melting of the depleted mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. V. 190. P. 137–151.
- Cheng Z.G., Zhang Z.C., Hou T., Santosh M., Chen L.L., Ke S., Xu L.J.** De-coupling of Mg–C and Sr–Nd–O isotopes traces the role of recycled carbon in magnesio-carbonatites from the Tarim Large Igneous Province // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. V. 202. P. 159–178.
- Conway C.H., Taylor H.P.** $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of coexisting minerals in the Oka and Magnet Cove carbonatite bodies // *Journal of Geology*. 1969. V. 77 (5). P. 618–626.
- De Paolo D.J., Wasserburg G.J.** Petrogenetic mixing models and Nd–Sr isotope patterns // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1979. V. 43. P. 615–627.
- Deines P.** Stable isotope variations in carbonatites // In: *Carbonatites. Genesis and Evolution*. London Unwyn Hyman, 1989. P. 301–359.
- Deines P.** The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths // *Earth-Science Reviews*. 2002. V. 58. P. 247–278.
- Démeny A., Ahijado A., Casillas R., Vennemann T.W.** Crustal contamination and fluid/rock interaction in the carbonatites of Fuerteventura (Canary Islands, Spain): A C, O, H isotope study // *Lithos*. 1998. V. 44. P. 101–115.
- Dickin A.P.** Radiogenic isotope geology. New York: Cambridge University Press, 2005. 492 p.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatenkov V.M.** Alkaline magmatism of the Vitim province, West Transbaikalia, Russia: Age, mineralogical, geochemical and isotope (O, C, D, Sr and Nd) data // *Lithos*. 2012. V. 152. P. 157–172.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Moore K.R.** Genesis of the Khaluta alkaline-basic Ba–Sr carbonatite complex (West Transbaikalia, Russia) // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98 (1–4). P. 245–268.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Viladkar S.G., Vladyskin N.V.** The Arshan REE carbonatites, southwestern Transbaikalia: mineralogy, paragenesis and evolution // *The Canadian Mineralogist*. 2008. V. 46. P. 807–824.
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladyskin N.V.** Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. V. 116. P. 81–96.
- Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S.** Calcite-bearing dolomite carbonatite dykes from Veseloe, North Transbaikalia, Russia and possible Cr-rich mantle xenoliths // *Mineralogy and Petrology*. 2007b. V. 90. P. 19–49.
- Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S.** Magmatic graphite in dolomite carbonatite at Pogranichnoe, North Transbaikalia, Russia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2007a. V. 153. P. 339–353.
- Dunworth E.A., Bell K.** The Turiy massif, Kola Peninsula, Russia: isotopic and geochemical evidence for multi-source evolution // *Journal of Petrology*. 2001. V. 42. P. 377–405.
- Ernst R.E., Bell K.** Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. P. 55–76.
- Farrell S., Bell K., Clark I.** Sulphur isotopes in carbonatites and associated silicate rocks from the Superior Province, Canada // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. P. 209–226.
- Giuliani A., Phillips D., Kamenetsky V.S., Fiorentini M.L., Farquhar J., Kendrick M.A.** Stable isotope (C, O, S) compositions of volatile-rich minerals in kimberlites: a review // *Chemical Geology*. 2014. V. 374. P. 61–83.
- Hart S.R., Hauri E.H., Oschmann L.A., Whitehead J.A.** Mantle plumes and entrainment: isotopic evidence // *Science*. 1992. V. 256. P. 517–520.
- Hoernle K., Tilton G., Le Bas M.J., Duggen S., Garbe-Schönberg D.** Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2002. V. 142. P. 520–542.
- Hofmann A.W.** Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: isotopes and trace elements // *Treatise on Geochemistry*. Elsevier Ltd., 2003. V. 2. P. 61–101.
- Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Elbaev A.L., Rampilov M.O., Ripp G.S.** Late Paleozoic alkaline magmatism in Western Transbaikalia, Russia: Implications for magma sources and tectonic settings // *Geoscience Frontiers*. 2020. V. 11. P. 1289–1303.
- Jones A.P., Genge M., Carmody L.** Carbonate Melts and Carbonatites // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2013. V. 75. P. 289–322.
- Keller J., Hoefs J.** Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatite from Oldoinyo Lengai // *Carbonatite vulcanism: Oldoinyo Lengai and the petrogenesis of natrocarbonatites* / eds. by K. Bell, J. Keller. 1995. IAVCE I. V. 4. P. 113–123.
- Kimura J.-I., Sakuyama T., Miyazaki T., Vaglarov B.S., Fukao Y., Stern R.J.** Plume–stagnant slab–lithosphere interactions: origin of the Late Cenozoic intra-plate basalts on the East Eurasia margin // *Lithos*. 2018. V. 300–301. P. 227–249.
- Kramm U., Kogarko L.N.** Nd and Sr isotope signatures of the Khibina and Lovozero apaitic centres, Kola alkaline province, Russia // *Lithos*. 1994. V. 32. P. 225–242.
- Lee M.J., Lee J.I., Hur S.D., Kim Y., Moutte J., Balaganskaya E.** Sr–Nd–Pb isotopic compositions of the Kovdor phoscorite-carbonatite complex, Kola Peninsula, NW Russia // *Lithos*. 2006. V. 91. P. 250–261.
- Li H., Zhang Z., Ernst R., Lu L., Santosh M., Zhang D., Cheng Z.** Giant radiating mafic dyke swarm of the Emeishan large igneous province: identifying the mantle plume centre // *Terra Nova*. 2015. V. 27. P. 247–257.
- Li Z., Li Y., Chen H., Santosh M., Yang S., Xu Y., Langmuir C. H., Chen Z., Yu X., Zou S.** Hf isotopic characteristics of the Tarim Permian large igneous province rocks of NW China: Implication for the magmatic source and evolution // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012. V. 49. P. 191–202.

- 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 // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1993. V. 114. P. 171–188.
- Malkovets V.G., Ionov D.A., Agashev A.M., Litasov Yu.D., Orihashi Yu., O'Reilly S.Y., Griffin W.L.** Structure and composition of the mantle beneath the Minusinsk region SW of the Siberian Craton: A Sr-Nd isotope and trace element study // *Abstr. 10th Annual Goldschmidt Conference*. Oxford, UK, 2000. V. 5 (2). P. 662–663.
- Martynov, Y.A., Khanchuk, A.I., Grebennikov, A.V., Chashchin A.A., Popov V.K.** Late Mesozoic and Cenozoic volcanism of the east Sikhote-Alin area (Russian Far East): a new synthesis of geological and petrological data // *Gondwana Research*. 2017. V. 47. P. 358–371.
- Mitchell R.H.** Carbonatites and carbonatites and carbonatites // *The Canadian Mineralogist*. 2005. V. 43 (6). P. 2049–2068.
- Moriyaki T., Miyazaki T., Kagami H., Vladyskin N.V., Chernysheva E.A., Panina L.I., Podgornych N.M.** Sr, Nd, C and O isotope characteristics of Siberian carbonatites // *Alkaline magmatism and the problems of mantle sources* / ed. by N.V. Vladyskin. *Proceeding of International Workshop*. Irkutsk, 2001. P. 69–84.
- Nedosekova I., Vladyskin N., Udoratina O., Belyatsky B.** Ore and geochemical specialization and substance sources of the Ural and Timan carbonatite complexes (Russia): Insights from trace element, Rb–Sr, and Sm–Nd isotope data // *Minerals*. 2021. V. 11. Article 711.
- Nedosekova I.L., Belousova E.A., Sharygin V.V., Belyatsky B.V., Baynova T.B.** Origin and evolution of the Il'meny-Vishnevogorsky carbonatites (Urals, Russia): Insights from trace-elements compositions, Rb–Sr, Sm–Nd, U–Pb and Lu–Hf isotope data // *Mineralogy and Petrology*. 2013. V. 107. P. 101–123.
- Nikiforov A.V., Dubinina E.O., Polyakov N.A., Sugorakova A.M., Khertek A.K.** Influence of Host Marble Rocks on the Formation of Intrusive Alkaline Rocks and Carbonatites of Sangilen (E. Siberia, Russia) // *Minerals*. 2021. V. 11. Article 666.
- Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V.** Late Mesozoic carbonatite provinces in Central Asia: Their compositions, sources and genetic settings // *Gondwana Research*. 2019. V. 69. P. 56–72.
- Nikolenko A.M., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Redina A.A., Prokopyev I.R., Vladyskin N.V., Nikolaeva I.V.** Ar–Ar geochronology and petrogenesis of the Mushgai–Khudag alkaline-carbonatite complex (southern Mongolia) // *Lithos*. 2020. V. 372–373. Article 105675.
- Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G.G.** Origin of REE-rich ferrocarnatites in southern Siberia (Russia): implications based on melt and fluid inclusions // *Mineralogy and Petrology*. 2016. V. 110. P. 845–859.
- Ray J.S., Ramesh R.** Evolution of carbonatite complexes of the Deccan flood basalt province: stable carbon and oxygen isotopic constraints // *Journal of Geophysical Research*. 1999. V. 104 (B12). P. 29471–29483.
- Ray J.S., Ramesh R.** Rayleigh fractionation of stable isotopes from a multicomponent source // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000. V. 64 (2). P. 299–306.
- Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V.** Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // *Lithos*. 2019. V. 338. P. 141–154.
- Salters V.J.M., Hart S.R.** The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs: the Hf-isotope connection // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. V. 104. P. 364–380.
- Santos R.V., Clayton R.N.** Variations of oxygen and carbon isotopes in carbonatites: a study of Brazilian alkaline complexes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. V. 59 (7). P. 1339–1352.
- Şengör A.C., Natal'in B.A., Burtman V.S.** Evolution of the alaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia // *Nature*. 1993. V. 364. P. 299–306.
- Sheppard S.M.F.** Characterization and isotopic variations in natural waters // *Reviews in Mineralogy*. 1986. V. 16. P. 165–183.
- Simonetti A., Goldstein S.L., Schmidberger S.S., Viladkar S.G.** Geochemical and Nd, Pb, and Sr isotope data from Deccan alkaline complexes – inferences for mantle sources and plume-lithosphere interaction // *Journal of Petrology*. 1998. V. 11&12. P. 1847–1864.
- Smith M.P., Campbell L.S., Kynicky J.** A review of the genesis of the world class Bayan Obo Fe–REE–Nb deposits, Inner Mongolia, China: multistage processes and outstanding questions // *Ore Geology Reviews*. 2015. V. 64. P. 459–476.
- Stacey J.C., Kramers J.D.** Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. V. 26. P. 207–221.
- Stracke A., Hofmann A.W., Hart S.R.** FOZO, HIMU, and the rest of the mantle zoo // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2005. V. 6 (5). Article Q05007.
- Tappe S., Foley S.F., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Heaman L.M., Stracke A., Jenner G.A.** Between carbonatite and lamproite – Diamondiferous Torngat ultramafic lamprophyres formed by carbonate-fluxed melting of cratonic MARID-type metasomes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. V. 72. P. 3258–3286.
- Taylor H.P.** The oxygen isotope geochemistry of igneous rocks // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1968. V. 19 (1). P. 1–71.
- Taylor H.P., Frechen J., Degens E.T.** Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See district, West Germany and Alnö district, Sweden // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1967. V. 31 (3). P. 407–430.
- Taylor H.P. Jr., Sheppard S.M.F.** Igneous rocks: I. Processes of isotopic fractionation and isotope systematics // *Reviews in Mineralogy*. 1986. V. 16. P. 227–271.
- Vladyskin N.V., Pirajno F.** Types of carbonatites: Geochemistry, genesis and mantle sources // *Lithos*. 2021. V. 386–387. Article 105982.
- Vorontsov A., Yarmolyuk V., Dril S., Ernst R., Perfilova O., Grinev O., Komaritsyna T.** Magmatism of the Devonian Altai-Sayan Rift System: Geological and geochemical evidence for diverse plume-lithosphere interactions // *Gondwana Research*. 2021a. V. 89. P. 193–219.
- Vorontsov A.A., Izokh A.E., Yarmolyuk V.V., Komaritsyna T.Y., Nikiforov A.V., Perfilova O.Y., Dril S.I., Rizvanova N.G., Dushkin E.P.** Evolution of syenite magmas: insights from the geology, geochemistry and O–Nd isotopic characteristics of the Ordovician Saibar intrusion, Altai-Sayan area, Russia // *Minerals*. 2021b. V. 11. Article 473.
- Vrublevskii V.V., Bukharova O.V., Nebera T.S., Sveshnikova V.L.** Composition and origin of rare-metal (Nb–Ta, REE) and sulfide mineralization in magnesiocarbonatites from the Yenisei Ridge, Central Siberia // *Ore Geology Reviews*. 2019b. V. 111. Article 102949.

- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Ernst R.E., Izokh A.E., Vishnevskii A.V.** The Overmarat-Gol alkaline pluton in Northern Mongolia: U–Pb age and preliminary implications for magma sources and tectonic setting // *Minerals*. 2019a. V. 9. Article 170.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutiérrez-Alonso G., Hofmann M., Grinev O.M., Mustafayev A.** Multiple intrusion stages and mantle sources of the Paleozoic Kuznetsk Alatau alkaline province, Southern Siberia: geochemistry and Permian U–Pb, Sm–Nd ages in the Goryachegorsk ijolite-foyaite intrusion // *International Geology Review*. 2021. V. 63 (18). P. 2215–2231.
- Vrublevskii V.V., Morova A.A., Bukharova O.V., Konovalenko S.I.** Mineralogy and geochemistry of Triassic carbonatites in the Matcha alkaline intrusive complex (Turkestan-Alai Ridge, Kyrgyz Southern Tien Shan), SW Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. V. 153. P. 252–281.
- Vrublevskii V.V., Nikiforov A.V., Sugorakova A.M., Kozulina T.V.** Petrogenesis and tectonic setting of the Cambrian Kharly alkaline–carbonatite complex (Sangilen Plateau, Southern Siberia): Implications for the Early Paleozoic evolution of magmatism in the western Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. V. 188. Article 104163.
- Wang C., Zhang Z., Giuliani A., Cheng Z., Liu B., Kong W.** Geochemical and O–C–Sr–Nd isotopic constraints on the petrogenetic link between aillikites and carbonatites in the Tarim large igneous province // *Journal of Petrology*. 2021. V. 62 (5). egab017.
- Wei X., Xu Y.-X., Feng Y.-X., Zhao J.-X.** Plume/lithosphere interaction in the generation of the Tarim large igneous province, NW China: Geochronological and geochemical constraints // *American Journal of Science*. 2014. V. 314. P. 314–356.
- White W.M.** Oceanic Island Basalts and Mantle Plumes: The Geochemical Perspective // *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2010. V. 38. P. 133–160.
- Wilson D.M.** Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach. Netherlands : Springer, 1989. 466 p.
- Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Ernst R.E.** Intraplate geodynamics and magmatism in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2014. V. 93. P. 158–179.
- Yaxley G.M., Ghosh S., Kiseeva E.S., Mallik A., Spandler C., Thomson A.R., Walter M.J.** CO₂-rich melts in Earth // *Deep carbon: Past to Present* (Eds. B.N. Orcutt, I. Daniel, R. Dasgupta). Cambridge : Cambridge University Press, 2020. P. 129–162.
- Zhang Y., Liu J., Guo Z.** Permian basaltic rocks in the Tarim basin, NW China: Implications for plume–lithosphere interaction // *Gondwana Research*. 2010. V. 18. P. 596–610.
- Zartman R.E., Doe B.R.** Plumbotectonics – the model // *Tectonophysics*. 1981. V. 75. P. 135–162.
- Zartman R.E., Haines S.M.** The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs – a case for bi-directional transport // *Geochimica et cosmochimica acta*. 1988. V. 52. P. 1327–1339.
- Zindler A., Hart S.R.** Chemical geodynamics // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1986. V. 14. P. 493–571.
- Zindler A., Jagoutz E., Goldstein S.** Nd, Sr and Pb isotopic systematics in a three-component mantle: a new perspective // *Nature*. 1982. V. 298 (5). P. 519–523.

Авторы:

Врублевский Василий Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой динамической геологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: vasvr@yandex.ru

Дорошкевич Анна Геннадьевна, доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией рудоносности щелочно-го магматизма, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Geosphere Research, 2021, 4, 6–26. DOI: 10.17223/25421379/21/1

V.V. Vrublevskii¹, A.G. Doroshkevich^{2,3}

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

³ Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

ISOTOPE SYSTEMATICS OF ALKALINE ROCKS AND CARBONATITES IN THE NORTHERN AND WESTERN ASIA FOLDED AREAS: A NEW DATA REVIEW

This review paper discusses current isotopic data of Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic alkaline rocks and carbonatites from Yenisei Ridge and the western part of the Central Asian orogenic belt (CAOB). The initial Nd, Sr, and Pb isotopic ratios of the magmatic complexes indicate heterogeneous sources with the participation of moderately depleted (PREMA/FOZO, HIMU) and enriched (EM) sublithospheric mantle components. The EM component proportion increases in the Late Paleozoic and Mesozoic alkaline magmatic rocks. Under conditions of a thicker continental crust, the plume component's impact on the metasomatized lithospheric mantle could lead to the formation of hybrid sources. The simultaneous radiogenic ⁸⁷Sr and heavy O, C, and S isotopes enrichment of alkaline rocks and carbonatites indicate the probability of upper crustal contamination. According to the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ ratio in the carbonates, a group of mantle–crustal carbonatites is distinguished. Geodynamic settings of magmatism reflect the general structural style of different epochs of tectonogenesis. In the Neoproterozoic, the relation of plume activity and rifts formation was manifested during the Rodinia supercontinent break-up. In the Paleozoic, the Paleo-Asian Ocean formation followed by accretion–collisional complexes in the CAOB led to the magmatism at the conditions of the interaction of the mantle plume with the former active continental margin. The rifting processes that took place in the Mesozoic could not reach the sublithospheric level and plume activity was limited by the melting of the continental lithospheric mantle.

Key words: alkaline rocks, carbonatites, isotope geochemistry, plume–lithospheric interaction

References

Baskina V.A., Volchanskaya I.K., Frikh-Khar D.I., Yarmolyuk V.V. *Provintsiya kaliyevykh shchelочно-osnovnykh i shchelочно-vulkanitov Yuzhnoy Mongolii* [The province of potassium alkaline-mafic and alkaline volcanics of Southern Mongolia] // *Izvestiya AN SSSR. Seriya Geologicheskaya*. 1977. N 10. pp. 88–106. In Russian

- Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Salnikova E.B., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Kotov A.B., Kovach V.P., Vernikovskaya I.V., Matushkin N.Yu., Yasenev A.M. Late Riphean alkaline magmatism in the western margin of the Siberian craton: a result of continental rifting or accretionary events? // *Doklady Earth Sciences*. 2008. V. 419(2). pp. 226–230.
- Vladykin N.V., Morikyo T., Miyazaki T. Sr and Nd isotopes geochemistry of alkaline and carbonatite complexes in Siberia and Mongolia and some geodynamic consequences // *Problems of sources of deep magmatism and plumes*. Irkutsk: The Institute of geography SB RAS. 2005. pp. 19–37.
- Vorontsov A.A., Fedoseev G.S., Andryushchenko S.V. Devonian volcanism in the Minusa basin in the Altai-Sayan area: geological, geochemical, and Sr–Nd isotopic characteristics of rocks // *Russian Geology and Geophysics*. 2013. V. 54(9). pp. 1001–1025.
- Vrublevskii V.V. Sources and geodynamic setting of petrogenesis of the Middle Cambrian Upper Petropavlovka alkaline basic pluton (Kuznetsk Alatau, Siberia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56(3). pp. 379–401.
- Vrublevskii V.V., Voitenko N.N., Romanov A.P., Polyakov G.V., Izokh A.E., Gertner I.F., Krupchatnikov V.I. Magma sources of triassic lamproites of Gornyi Altai and Taimyr: Sr and Nd isotope evidence for plume-lithosphere interaction // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 405A (9). pp. 1365–1367.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F. Paleozoic alkaline-mafic intrusions of the Kuznetsk Alatau, their sources and conditions for magma generation // *Petrology*. 2021. V. 29(1). pp. 24–53.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutiérrez-Alonso G., Hofmann M., Grinev O.M., Tishin P.A. Isotope (U–Pb, Sm–Nd, Rb–Sr) geochronology of alkaline basic plutons of the Kuznetsk Alatau // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55(11). pp. 1264–1277.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Zhuravlev D.Z., Makarenko N.A. The Sm–Nd isotopic age and source of comagmatic alkaline mafic rocks and carbonatites of Kuznetsk Alatau // *Doklady Earth Sciences*. 2003a. V. 391A (6). pp. 832–835.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Polyakov G.V., Izokh A.E., Krupchatnikov V.I., Travin A.V., Voitenko N.N. Ar–Ar-isotopic age of lamproite dikes of the Chuiskii complex, Gornyi Altai // *Doklady Earth Sciences*. 2004. V. 399A (9). pp. 1252–1255.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Chugaev A.V. Parental sources of high-alumina alkaline melts: Nd, Sr, Pb, and O isotopic evidence from the Devonian Kiya–Shaltyr gabbro–urtite intrusion, South Siberia // *Doklady Earth Sciences*. 2018a. V. 479, Part 2. pp. 518–523.
- Vrublevskii V.V., Grinev O.M., Izokh A.E., Travin A.V. Geochemistry, isotope triad (Nd–Sr–O), and ^{40}Ar – ^{39}Ar age of Paleozoic alkaline mafic intrusions of the Kuznetsk Alatau (by the example of the Belaya Gora pluton) // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. V. 57(3). pp. 464–472.
- Vrublevskii V.V., Izokh A.E., Polyakov G.V., Gertner I.F., Yudin D.S., Krupchatnikov V.I. Early Paleozoic alkaline magmatism of the Altai Mountains: ^{40}Ar – ^{39}Ar geochronology data for the Edel’veis complex // *Doklady Earth Sciences*. 2009. V. 427(5). pp. 846–850.
- Vrublevskii V.V., Kotelnikov A.D., Izokh A.E. The age and petrologic and geochemical conditions of formation of the Kogtakh gabbro–monzonite complex in the Kuznetsk Alatau // *Russian Geology and Geophysics*. 2018b. V. 59(7). pp. 718–744.
- Vrublevskii V.V., Krupchatnikov V.I., Izokh A.E., Gertner I.F. The alkaline and carbonatitic rocks of Gornyi Altai (Edel’veis complex) as indicators of Early Paleozoic plume magmatism in the Central Asian Fold Belt // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. V. 53(8). pp. 721–735.
- Vrublevskii V.V., Nikiforov A.V., Sugorakova A.M., Kozulina T.V. Mantle–crustal nature of Early Paleozoic alkaline intrusions in Central Sangilen, Tuva (from Nd, Sr, Pb, C, and O isotope data) // *Russian Geology and Geophysics*. 2019. V. 60(5). pp. 451–462.
- Vrublevskii V.V., Pokrovskii B.G., Zhuravlev D.Z., Anoshin G.N. Composition and age of the Penchenga linear carbonatite complex, Yenisei range // *Petrology*. 2003b. V. 11(2). pp. 130–146.
- Vrublevskii V.V., Reverdatto V.V., Izokh A.E., Gertner I.F., Yudin D.S., Tishin P.A. Neoproterozoic carbonatite magmatism of the Yenisei Ridge, Central Siberia: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Penchenga Rock Complex // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 437, Part 2. pp. 443–448.
- Gordienko I.V. Relationship between subduction-related and plume magmatism at the active boundaries of lithospheric plates in the interaction zone of the Siberian continent and Paleasian ocean in the Neoproterozoic and Paleozoic // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2019. V. 10(2). P. 405–457.
- Dobretsov N.L. Distinctive petrological, geochemical, and geodynamic features of subduction-related magmatism // *Petrology*. 2010. V. 18(1). P. 84–106.
- Dobretsov N.L., Shatskiy A.F. Deep carbon cycle and geodynamics: the role of the core and carbonatite melts in the lower mantle // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. V. 53(11). pp. 1117–1132.
- Doroshkevich A.G. *Petrologiya karbonatitovykh i karbonatitsoedershashchikh shchelochnykh kompleksov Zapadnogo Zabaykal’ya* [Petrology of carbonatite and carbonatite-bearing alkaline complexes of the Western Transbaikalia]. Doc. Sci. Thesis. 2013. 31 p. In Russian
- Doroshkevich A.G., Izbrodin I.A., Rampilov M.O., Ripp G.S., Lastochkin E.I., Khubanov V.B. Permo-Triassic stage of alkaline magmatism in the Vitim plateau (Western Transbaikalia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2018. V. 59(9). pp. 1061–1077.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S. Isotopic systematics of the rocks of the Khalyuta carbonatite complex of Western Transbaikalia // *Geochemistry International*. 2009. V. 47(12). pp. 1198–1211.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Vladykin N.V., Savatenkov V.V. Sources of the Late Riphean carbonatite magmatism of northern Transbaikalia: geochemical and isotope-geochemical data // *Geochemistry International*. 2011. V. 49(12). pp. 1195–1207.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Sergeev S.A., Travin A.V. Geochronology of the Gulkhen massif, Vitim alkali province, Western Transbaikalia // *Doklady Earth Sciences*. 2014. V. 457(6). pp. 940–944.
- Zartman R.E., Kogarko L.N. A Pb isotope investigation of the Lovozero apatitic nepheline syenite, Kola Peninsula, Russia // *Doklady Earth Sciences*. 2014. V. 454(1). pp. 25–28.
- Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Rampilov M.O., Ripp G.S., Lastochkin E.I., Khubanov V.B., Posokhov V.F., Vladykin N.V. Age and mineralogical and geochemical parameters of rocks of the China alkaline massif (Western Transbaikalia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2017. V. 58(8). pp. 903–921.
- Kogarko L.N., Foland K., Henderson M. The Guli ultrabasic alkaline massif in Polar Siberia: evolution and isotope sources // *Doklady Earth Sciences*. 1999. V. 364. pp. 88–90.
- Kogarko L.N., Zartman R.E. New data on the age of the Guli intrusion and implications for the relationships between alkaline magmatism in the Maymecha-Kotuy province and the Siberian superplume: U–Th–Pb isotopic systematics // *Geochemistry International*. 2011. V. 49(5). pp. 439–448.

- Krupchatnikov V.I., Vrublevskii V.V., Kruk N.N. Early Mesozoic lamproites and monzonitoids of southeastern Gorny Altai: geochemistry, Sr–Nd isotope composition, and sources of melts // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56(6). pp. 825–843.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V. Mantle plumes of Northeast Asia and their role in forming endogenous deposits // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55(2). pp. 120–143.
- Kuleshov V.N. *Izotopnyy sostav i proiskhozhdeniye glubinnnykh karbonatov* [Isotopic composition and origin of deep carbonates]. Moscow: Nauka, 1986. 124 p. In Russian
- Kuleshov V.N., Pervov V.A. *Izotopnyy sostav ugleroda i kisloroda apatit-kal'tsitovykh porod rayona Ulugey-Khid (Yuzhnaya Mongoliya)* [Carbon and oxygen isotopic composition of apatite-calcite rocks of the Ulugei-Khid area (Southern Mongolia)] // *Izvestiya AN SSSR. Seriya Geologicheskaya*. 1982. N 10. pp. 44–51. In Russian
- Lapin A.V., Ploshko V.V., Malyshev A.A. *Karbonatity zony Tatarskogo glubinnogo razloma na Eniseyskom kryazhe* [Carbonatites from the Tatarka deep fault zone, Yenisei Ridge] // *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii*. 1987. No. 1. pp. 30–45. In Russian
- Nikiforov A.V., Bolonin A.V., Pokrovsky B.G., Sugorakova A.M., Chugaev A.V., Lykhin D.A. Isotope geochemistry (O, C, S, Sr) and Rb–Sr age of carbonatites in Central Tuva // *Geology of Ore Deposits*. 2006. V. 48(4). pp. 256–276.
- Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V., Salnikova E.B., Kotov A.B., Anisimova I.V., Sugorakova A.M. Early Permian age of nepheline syenites of the Korgere–Daba massif (Sangilen highlands, Tuva) // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 485(1). pp. 235–237.
- Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V. Early Paleozoic age and geodynamic setting of the Botogol and Khushagol alkaline massifs in the Central Asian foldbelt // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 412(1). pp. 6–10.
- Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Ivanov V.G., Zhuravlev D.Z. Late Mesozoic carbonatites of Western Transbaikalia: isotopic-geochemical characteristics and sources // *Petrology*. 2002. V. 10(2). pp. 14–14.
- Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Andreeva I.A., Zhuravlev D.Z., Pokrovskii B.G., Korshunov V.V., Ivanov V.G., Vladyskin N.V., Ripp G.S. Late Mesozoic carbonatites of Western Transbaikalia: mineralogical, chemical, and isotopic (O, C, S, and Sr) characteristics and relationships to alkaline magmatism // *Petrology*. 2000. V. 8(3). pp. 278–302.
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bayanova T.B., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Postnikov A.A., Travin, A.V., Ernst R.E. Neoproterozoic rift and within-plate magmatism in the Yenisei Ridge: implications for the breakup of Rodinia // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49(7). pp. 503–519.
- Pokrovskii B.G. *Korovaya kontaminatsiya mantiynykh magm po dannym izotopnoy geokhimii* [Crustal contamination of mantle magmas: evidence from isotope geochemistry]. Moscow: Nauka, 2000. 228 p. In Russian
- Pokrovskii B.G., Andreeva E.D., Vrublevskii V.V., Grinev O.M. Contamination mechanisms of alkaline-gabbroid intrusions in the southern framing of the Siberian platform: evidence from strontium and oxygen isotopic compositions // *Petrology*. 1998. V. 6(3). pp. 237–251.
- Ripp G.S., Doroshkevich A.G., Posokhov V.F. Age of carbonatite magmatism in Transbaikalia // *Petrology*. 2009. V. 17(1). pp. 73–89.
- Sazonov A.M., Vrublevsky V.V., Gertner I.F., Fedorova A.V., Gavrilenko V.V., Zvyagina E.A., Leont'ev S.I. The Transangara alkaline pluton, Yenisei range: Rb–Sr and Sm–Nd isotope ages and sources of feldspathoid magmas in Late Precambrian // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 413A (3). pp. 469–473.
- Salnikova E.B., Stifeeva M.V., Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B., Anisimova I.V., Sugorakova A.M., Vrublevskii V.V. Andradite–mormototoite garnets as promising U–Pb geochronometers for dating ultrabasic alkaline rocks // *Doklady Earth Sciences*. 2018. V. 480. Part 2. pp. 778–782.
- Salnikova E.B., Yakovleva S.Z., Nikiforov A.V., Kotov A.B., Yarmolyuk V.V., Anisimova I.V., Sugorakova A.M., Plotkina Yu.V. Bastnaesite: A Promising U–Pb Geochronological Tool // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. Part 1. pp. 134–136.
- Sveshnikova E.V., Semenov E.I., Khomyakov A.M. *Zaangarskiy shchelochnoy massiv, ego porody i mineraly* [The Transangara alkali massif and its rocks and minerals]. Moscow: Nauka, 1976. 80 p. In Russian
- Frolov A.A., Tolstov A.V., Belov S.V. *Karbonatitovyye mestorozhdeniya Rossii* [Carbonatite deposits of Russia]. Moscow: NIA Priroda, 2003. 287 p. In Russian
- Khromova E.A., Doroshkevich A.G., Izbrodin I.A. Geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic characteristics of alkaline rocks and carbonatite of the Belaya Zima Massif (Eastern Sayan) // *Geosphere Research*. 2020. N 1. pp. 33–55. In Russian
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I. Deep geodynamics and mantle plumes: their role in the formation of the Central Asian fold belt // *Petrology*. 2003. V. 11(6). pp. 504–531.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Nikiforov A.V., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Vladyskin N.V. Late Riphean rifting and breakup of Laurasia: data on geochronological studies of ultramafic alkaline complexes in the southern framing of the Siberian craton // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 404(7). pp. 1031–1036.
- Yarmolyuk V.V., Kuz'min M.I., Vorontsov A.A. West Pacific-type convergent boundaries and their role in the formation of the Central Asian Fold Belt // *Russian Geology and Geophysics*. 2013. V. 54(12). P. 1427–1441.
- Yashina R.M. *Shchelochnoy magmatizm skladchato-glybovykh oblastey (na primere yuzhnogo obramleniya Sibirskoy platformy)* [Alkaline magmatism in orogenic areas (case of the southern framing of the Siberian craton)]. Moscow: Nauka, 1982. 274 p. In Russian
- Baatar M., Ochir G., Kynicky J., Iizumi S., Comin-Chiaramonti P. Some notes on the Lugiin Gol, Mushgai Khudag, and Bayan Khoshuu alkaline complexes, southern Mongolia // *International Journal of Geosciences*. 2013. V. 4. P. 1200–1214.
- Bell K. Carbonatites: Genesis and Evolution (Ed.). London: Unwin-Hyman, 1989. 610 p.
- Bell K., Kjarsgaard B.A., Simonetti A. Carbonatites – into the twenty-first century (Preface). // *Journal of Petrology*. 1998. V. 39(11/12). pp. 1839–1845.
- Bell K., Simonetti A. Source of parental melts to carbonatites—critical isotopic constraints // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. pp. 77–89.
- Bell K., Tilton G.R. Nd, Pb and Sr isotopic compositions of East African carbonatites: evidence for mantle mixing and plume inhomogeneity // *Journal of Petrology*. 2001. V. 42. pp. 1927–1945.
- Bell K., Zaitsev A.N., Spratt J., Frojdo S., Rukhlov A.S. 2015. Elemental, lead and sulfur isotopic compositions of galena from Kola carbonatites, Russia – implications for melt and mantle evolution // *Mineralogical Magazine*. 2015. V. 79(2). pp. 219–241.
- Blichert-Toft J., Albarède F. The Lu–Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system // *Earth and Planetary Science Letters*. 1997. V. 148. pp. 243–258.
- 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 and Planetary Science Letters*. 2008. V. 273. pp. 48–57.

- Bowman, J.R. Stable-isotope systematics in skarns // In: Mineralized intrusion-related skarn systems (ed. D.R. Lentz). Mineralogical Association of Canada Short Course. 1998. V. 26. pp. 1–49.
- Brassinnes S., Demaiffe D., Balaganskaya E., Downes H. New mineralogical and geochemical data on the Vuorijarvi ultramafic, alkaline and carbonatitic complex (Kola Region, NW Russia) // *Periodico di Mineralogia*. 2003. V. 72. pp. 79–86.
- Chauvel C., Lewin E., Carpentier M., Arndt N.T., Marini J.-C. Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf–Nd mantle array // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. pp. 64–67.
- Chauvel C., Blichert-Toft J. A hafnium isotope and trace element perspective on melting of the depleted mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. V. 190. pp. 137–151.
- Cheng Z.G., Zhang Z.C., Hou T., Santosh M., Chen L.L., Ke S., Xu L.J. De-coupling of Mg–C and Sr–Nd–O isotopes traces the role of recycled carbon in magnesiocarbonatites from the Tarim Large Igneous Province // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. V. 202. pp. 159–178.
- Conway C.H., Taylor H.P. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of coexisting minerals in the Oka and Magnet Cove carbonatite bodies // *Journal of Geology*. 1969. V. 77(5). pp. 618–626.
- De Paolo D.J., Wasserburg G.J. Petrogenetic mixing models and Nd–Sr isotope patterns // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1979. V. 43. pp. 615–627.
- Deines P. Stable isotope variations in carbonatites // In: Carbonatites. Genesis and Evolution. London Unwyn Hyman, 1989. pp. 301–359.
- Deines P. The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths // *Earth-Science Reviews*. 2002. V. 58. pp. 247–278.
- Démeny A., Ahijado A., Casillas R., Vennemann T.W. Crustal contamination and fluid/rock interaction in the carbonatites of Fuerteventura (Canary Islands, Spain): A C, O, H isotope study // *Lithos*. 1998. V. 44. pp. 101–115.
- Dickin A.P. Radiogenic isotope geology. New York: Cambridge University Press, 2005. 492 p.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatenkov V.M. Alkaline magmatism of the Vitim province, West Transbaikalia, Russia: Age, mineralogical, geochemical and isotope (O, C, D, Sr and Nd) data // *Lithos*. 2012. V. 152. pp. 157–172.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Moore K.R. Genesis of the Khaluta alkaline-basic Ba–Sr carbonatite complex (West Transbaikalia, Russia) // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98(1–4). pp. 245–268.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Viladkar S.G., Vladyskin N.V. The Arshan REE carbonatites, southwestern Transbaikalia: mineralogy, paragenesis and evolution // *The Canadian Mineralogist*. 2008. V. 46. pp. 807–824.
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladyskin N.V. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. V. 116. pp. 81–96.
- Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S. Calcite-bearing dolomite carbonatite dykes from Veseloe, North Transbaikalia, Russia and possible Cr-rich mantle xenoliths // *Mineralogy and Petrology*. 2007b. V. 90. pp. 19–49.
- Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S. Magmatic graphite in dolomite carbonatite at Pogranichnoe, North Transbaikalia, Russia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2007a. V. 153. pp. 339–353.
- Dunworth E.A., Bell K. The Turiiy massif, Kola Peninsula, Russia: isotopic and geochemical evidence for multi-source evolution. *Journal of Petrology*. 2001. V. 42. pp. 377–405.
- Ernst R.E., Bell K. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. pp. 55–76.
- Farrell S., Bell K., Clark I. Sulphur isotopes in carbonatites and associated silicate rocks from the Superior Province, Canada // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. pp. 209–226.
- Giuliani A., Phillips D., Kamenetsky V.S., Fiorentini M.L., Farquhar J., Kendrick M.A. Stable isotope (C, O, S) compositions of volatile-rich minerals in kimberlites: a review // *Chemical Geology*. 2014. V. 374. pp. 61–83.
- Hart S.R., Hauri E.H., Oschmann L.A., Whitehead J.A. Mantle plumes and entrainment: isotopic evidence // *Science*. 1992. V. 256. pp. 517–520.
- Hoernle K., Tilton G., Le Bas M.J., Duggen S., Garbe-Schönberg D. Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2002. V. 142. pp. 520–542.
- Hofmann A.W. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: isotopes and trace elements // *Treatise on Geochemistry*. Elsevier Ltd., 2003. V. 2. pp. 61–101.
- Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Elbaev A.L., Rampilov M.O., Ripp G.S. Late Paleozoic alkaline magmatism in Western Transbaikalia, Russia: Implications for magma sources and tectonic settings // *Geoscience Frontiers*. 2020. V. 11. pp. 1289–1303.
- Jones A.P., Genge M., Carmody L. Carbonate Melts and Carbonatites // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2013. V. 75. pp. 289–322.
- Keller J., Hoefs J. Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatite from Oldoinyo Lengai // *Carbonatite vulcanism: Oldoinyo Lengai and the petrogenesis of natrocarbonatites* (Eds. K. Bell, J. Keller). 1995. IAVCE I. V. 4. pp. 113–123.
- Kimura J.-I., Sakuyama T., Miyazaki T., Vaglarov B.S., Fukao Y., Stern R.J. Plume–stagnant slab–lithosphere interactions: origin of the Late Cenozoic intra-plate basalts on the East Eurasia margin // *Lithos*. 2018. V. 300–301. pp. 227–249.
- Kramm U., Kogarko L.N. Nd and Sr isotope signatures of the Khibina and Lovozero agpaite centres, Kola alkaline province, Russia // *Lithos*. 1994. V. 32. pp. 225–242.
- Krupchatnikov V.I., Vrublevskii V.V., Kruk N.N. Early Mesozoic lamproites and monzonitoids of southeastern Gorny Altai: geochemistry, Sr–Nd isotope composition, and sources of melts // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56(6). pp. 825–843.
- Lee M.J., Lee J.I., Hur S.D., Kim Y., Moutte J., Balaganskaya E. Sr–Nd–Pb isotopic compositions of the Kovdor phosphorite-carbonatite complex, Kola Peninsula, NW Russia // *Lithos*. 2006. V. 91. pp. 250–261.
- Li H., Zhang Z., Ernst R., Lu L., Santosh M., Zhang D., Cheng Z., Giant radiating mafic dyke swarm of the Emeishan large igneous province: identifying the mantle plume centre // *Terra Nova*. 2015. V. 27. pp. 247–257.
- Li Z., Li Y., Chen H., Santosh M., Yang S., Xu Y., Langmuir C. H., Chen Z., Yu X., Zou S. Hf isotopic characteristics of the Tarim Permian large igneous province rocks of NW China: Implication for the magmatic source and evolution // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012. V. 49. pp. 191–202.
- 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 // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1993. V. 114. pp. 171–188.

- Malkovets V.G., Ionov D.A., Agashev A.M., Litasov Yu.D., Orihashi Yu., O'Reilly S.Y., Griffin W.L. Structure and composition of the mantle beneath the Minusinsk region SW of the Siberian Craton: A Sr-Nd isotope and trace element study // *Abstr. 10th Annual Goldschmidt Conference*. 2000. Oxford, UK. V. 5(2). pp. 662–663.
- Martynov, Y.A., Khanchuk, A.I., Grebennikov, A.V., Chashchin A.A., Popov V.K. Late Mesozoic and Cenozoic volcanism of the east Sikhote-Alin area (Russian Far East): a new synthesis of geological and petrological data // *Gondwana Research*. 2017. V. 47. pp. 358–371.
- Mitchell R.H. Carbonatites and carbonatites and carbonatites // *The Canadian Mineralogist*. 2005. V. 43(6). pp. 2049–2068.
- Moriyaki T., Miyazaki T., Kagami H., Vladyskin N.V., Chernysheva E.A., Panina L.I., Podgornych N.M. Sr, Nd, C and O isotope characteristics of Siberian carbonatites // *Alkaline magmatism and the problems of mantle sources* (Ed. N.V. Vladyskin). *Proceeding of International Workshop*. Irkutsk, 2001. pp. 69–84.
- Nedosekova I.; Vladyskin N.; Udoratina O.; Belyatsky B. Ore and geochemical specialization and substance sources of the Ural and Timan carbonatite complexes (Russia): Insights from trace element, Rb–Sr, and Sm–Nd isotope data // *Minerals*. 2021. V. 11. Article 711.
- Nedosekova I.L.; Belousova E.A.; Sharygin V.V.; Belyatsky B.V.; Baynova T.B. Origin and evolution of the Il'meny-Vishnevogorsky carbonatites (Urals, Russia): Insights from trace-elements compositions, Rb–Sr, Sm–Nd, U–Pb and Lu–Hf isotope data // *Mineralogy and Petrology*. 2013. V. 107. pp. 101–123.
- Nikiforov A.V., Dubinina E.O., Polyakov N.A., Sugorakova A.M., Khertek A.K. Influence of Host Marble Rocks on the Formation of Intrusive Alkaline Rocks and Carbonatites of Sangilen (E. Siberia, Russia) // *Minerals*. 2021. V. 11. Article 666.
- Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V. Late Mesozoic carbonatite provinces in Central Asia: Their compositions, sources and genetic settings // *Gondwana Research*. 2019. V. 69. pp. 56–72.
- Nikolenko A.M., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Redina A.A., Prokopyev I.R., Vladyskin N.V., Nikolaeva I.V. Ar–Ar geochronology and petrogenesis of the Mushgai–Khudag alkaline-carbonatite complex (southern Mongolia) // *Lithos*. 2020. V. 372–373. Article 105675.
- Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G.G. Origin of REE-rich ferrocarnatites in southern Siberia (Russia): implications based on melt and fluid inclusions // *Mineralogy and Petrology*. 2016. V. 110. pp. 845–859.
- Ray J.S., Ramesh R. Evolution of carbonatite complexes of the Deccan flood basalt province: stable carbon and oxygen isotopic constraints // *Journal of Geophysical Research*. 1999. V. 104(B12). pp. 29471–29483.
- Ray J.S., Ramesh R. Rayleigh fractionation of stable isotopes from a multicomponent source // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000. V. 64(2). P. 299–306.
- Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V. Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // *Lithos*. 2019. V. 338. pp. 141–154.
- Salter V.J.M., Hart S.R. The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs: the Hf-isotope connection // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. V. 104. pp. 364–380.
- Santos R.V., Clayton R.N. Variations of oxygen and carbon isotopes in carbonatites: a study of Brazilian alkaline complexes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. V. 59(7). pp. 1339–1352.
- Şengör A.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the alaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia // *Nature*. 1993. V. 364. pp. 299–306.
- Sheppard S.M.F. Characterization and isotopic variations in natural waters // *Reviews in Mineralogy*. 1986. V. 16. pp. 165–183.
- Simonetti A., Goldstein S.L., Schmidberger S.S., Viladkar S.G. Geochemical and Nd, Pb, and Sr isotope data from Deccan alkaline complexes – inferences for mantle sources and plume-lithosphere interaction // *Journal of Petrology*. 1998. V. 11&12. pp. 1847–1864.
- Smith M.P., Campbell L.S., Kynicky J. A review of the genesis of the world class Bayan Obo Fe–REE–Nb deposits, Inner Mongolia, China: multistage processes and outstanding questions // *Ore Geology Reviews*. 2015. V. 64. pp. 459–476.
- Stacey J.C., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. V. 26. pp. 207–221.
- Stracke A., Hofmann A.W., Hart S.R. FOZO, HIMU, and the rest of the mantle zoo // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2005. V. 6(5). Article Q05007.
- Tappe S., Foley S.F., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Heaman L.M., Stracke A., Jenner G.A. Between carbonatite and lamproite – Diamondiferous Torngat ultramafic lamprophyres formed by carbonate-fluxed melting of cratonic MARID-type metasomes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. V. 72. pp. 3258–3286.
- Taylor H.P. The oxygen isotope geochemistry of igneous rocks // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1968. V. 19(1). pp. 1–71.
- Taylor H.P., Frechen J., Degens E.T. Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See district, West Germany and Alnö district, Sweden // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1967. V. 31(3). pp. 407–430.
- Taylor, H.P. Jr., Sheppard, S.M.F. Igneous rocks: I. Processes of isotopic fractionation and isotope systematics // *Reviews in Mineralogy*. 1986. V. 16. pp. 227–271.
- Vladyskin N.V., Pirajno. F. Types of carbonatites: Geochemistry, genesis and mantle sources // *Lithos*. 2021. V. 386–387. Article 105982.
- Vorontsov A., Yarmolyuk V., Dril S., Ernst R., Perfilova O., Grinev O., Komaritsyna T. Magmatism of the Devonian Altai-Sayan Rift System: Geological and geochemical evidence for diverse plume-lithosphere interactions // *Gondwana Research*. 2021a. V. 89. pp. 193–219.
- Vorontsov A.A., Izokh A.E., Yarmolyuk V.V., Komaritsyna T.Y., Nikiforov A.V., Perfilova O.Y., Dril S.I., Rizvanova N.G., Dushkin E.P. Evolution of syenite magmas: insights from the geology, geochemistry and O–Nd isotopic characteristics of the Ordovician Saibar intrusion, Altai-Sayan area, Russia // *Minerals*. 2021b. V. 11. Article 473.
- Vrublevskii V.V., Bukharova O.V., Nebera T.S., Sveshnikova V.L. Composition and origin of rare-metal (Nb–Ta, REE) and sulfide mineralization in magnesiocarbonatites from the Yenisei Ridge, Central Siberia // *Ore Geology Reviews*. 2019b. V. 111. Article 102949.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Ernst R.E., Izokh A.E., Vishnevskii A.V. The Overmarat-Gol alkaline pluton in Northern Mongolia: U–Pb age and preliminary implications for magma sources and tectonic setting // *Minerals*. 2019a. V. 9. Article 170.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutiérrez-Alonso G., Hofmann M., Grinev O.M., Mustafaev A. Multiple intrusion stages and mantle sources of the Paleozoic Kuznetsk Alatau alkaline province, Southern Siberia: geochemistry and Permian U–Pb, Sm–Nd ages in the Goryachegorsk ijolite-foyaite intrusion // *International Geology Review*. 2021. V. 63 (18). pp. 2215–2231.

Vrublevskii V.V., Morova A.A., Bukharova O.V., Konovalenko S.I. Mineralogy and geochemistry of Triassic carbonatites in the Matcha alkaline intrusive complex (Turkestan-Alai Ridge, Kyrgyz Southern Tien Shan), SW Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. V. 153. pp. 252–281.

Vrublevskii V.V., Nikiforov A.V., Sugorakova A.M., Kozulina T.V. Petrogenesis and tectonic setting of the Cambrian Kharly alkaline–carbonatite complex (Sangilen Plateau, Southern Siberia): Implications for the Early Paleozoic evolution of magmatism in the western Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. V. 188. Article 104163.

Wang C., Zhang Z., Giuliani A., Cheng Z., Liu B., Kong W. Geochemical and O–C–Sr–Nd isotopic constraints on the petrogenetic link between aillikites and carbonatites in the Tarim large igneous province // *Journal of Petrology*. 2021. V. 62(5). egab017.

Wei X., Xu Y.-G., Feng Y.-X., Zhao J.-X. Plume–lithosphere interaction in the generation of the Tarim large igneous province, NW China: Geochronological and geochemical constraints // *American Journal of Science*. 2014. V. 314. pp. 314–356.

White W.M. Oceanic Island Basalts and Mantle Plumes: The Geochemical Perspective // *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2010. V.38. pp. 133–160.

Wilson D.M. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Springer Netherlands, 1989. 466 p.

Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Ernst R.E. Intraplate geodynamics and magmatism in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2014. V. 93. pp. 158–179.

Yaxley G.M., Ghosh S., Kiseeva E.S., Mallik A., Spandler C., Thomson A.R., Walter M.J. CO₂-rich melts in Earth // *Deep carbon: Past to Present* (Eds. B.N. Orcutt, I. Daniel, R. Dasgupta). Cambridge: Cambridge University Press, 2020. pp. 129–162.

Zhang Y., Liu J., Guo Z. Permian basaltic rocks in the Tarim basin, NW China: Implications for plume–lithosphere interaction // *Gondwana Research*. 2010. V. 18. P. 596–610.

Zartman R.E., Doe B.R. Plumbotectonics – the model // *Tectonophysics*. 1981. V. 75. pp. 135–162.

Zartman R.E., Haines S.M. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs – a case for bi-directional transport // *Geochimica et cosmochimica acta*. 1988. V. 52. pp. 1327–1339.

Zindler A., Hart S.R. Chemical geodynamics // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1986. V. 14. pp. 493–571.

Zindler A., Jagoutz E., Goldstein S. Nd, Sr and Pb isotopic systematics in a three-component mantle: a new perspective // *Nature*. 1982. V. 298(5). pp. 519–523.

Author's:

Vrublevskii Vassily V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Head of Department of Dynamical Geology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: vasvr@yandex.ru

Doroshkevich Anna G., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory of ore-bearing alkaline magmatism, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru