

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Национальный  
исследовательский  
Томский  
государственный  
университет



# Петрология магматических и метаморфических комплексов

## Выпуск 10

Материалы X Всероссийской конференции  
с международным участием

27 ноября – 30 ноября 2018 года



Реолгрейд  
сервис

Лучшие решения  
для вашей лаборатории

Томск 2018

# ЩЕЛОЧНОЙ МАГМАТИЗМ ЧУКТУКОНСКОГО МАССИВА, ЧАДОБЕЦКОЕ ПОДНЯТИЕ: ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА, ЭВОЛЮЦИЯ МАГМ И СВЯЗЬ С ТРИАСОВОЙ СИБИРСКОЙ ИЗВЕРЖЕННОЙ ПРОВИНЦИЕЙ

А.Г. Дорошкевич<sup>1,2,3</sup>, Д.А. Чеботарев<sup>1</sup>, В.В. Шарыгин<sup>1,4,5</sup>, И.Р. Прокопьев<sup>1,4</sup>, А.М. Николенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, ул. Академика Коптюга., 3, 630090 (E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru)

<sup>2</sup>Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Сахьяновой ба, 670047

<sup>3</sup>Томский Государственный Университет, Томск, ул. Ленина, 36, 634050

<sup>4</sup>Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, 630090

<sup>5</sup>Уральский Федеральный Университет, ул. Мира, 2, Екатеринбург, 620002

## ALKALINE MAGMATISM OF THE CHUKTUKON MASSIF, CHADOBETS UPLAND (RUSSIA): SOURCES, EVOLUTION OF THE MAGMAS AND THEIR RELATION TO THE TRIASSIC SIBERIAN LIP

A.G. Doroshkevich<sup>1,2,3</sup>, D.A. Chebotarev<sup>1</sup>, V.V. Sharygin<sup>1,4,5</sup>, I.R. Prokopyev<sup>1,4</sup>, A.M. Nikolenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Str., 3, 630090, Russia (E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru)

<sup>2</sup>Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Sakhyanovoy Str., 6a, 670047, Russia

<sup>3</sup>Tomsk State University, Tomsk, Lenin Ave., 36, 634050, Russia

<sup>4</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Pirogova Str., 2, 630090, Russia

<sup>5</sup>Institute of Physics and Technology, Ural Federal University, ul. Mira 2, Ekaterinburg, 620002, Russia

*The petrogenesis of temporal and spatially associated carbonatitic and deeply derived carbonated alkaline silicate magmas provides an opportunity to gain insights into the nature of the deepest lithospheric mantle. The Chuktukon massif, which is part of the Chadobets alkaline ultramafic carbonatite complex (Chadobets upland, Siberian craton) is a carbonatite-melilitite-aillikite intrusion, whose emplacement was coeval with Triassic volcanic-magmatic activity at the Siberian craton. In this study, we clarified the sources of the primary melts, reconstructed the magmatic evolution of the complex and discussed the relationship with the Siberian LIP. Isotopic information leads us to propose that the source for the Chuktukon primary melts was isotopically depleted. We conclude that the primary melts were formed by low degree partial melting of long-lived garnet carbonated peridotite under the influence of heat from the plume. The major and trace element characteristics of the carbonatites are consistent with the formation of carbonatites by liquid immiscibility.*

Чадобецкий щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс расположен на Чадобецком поднятии (водосборная площадь р. Чадобец, Красноярский край) в южной части Сибирского кратона. Чадобецкое поднятие имеет размер 40x50 км, окружено системой кольцевых разломов и включает Чуктуконский и Теринковский массивы. Образование поднятия связано с подъемом магматического диапира и формированием промежуточной магматической камеры на глубине 4 км, что подтверждается геофизическими данными (Кириченко и др., 2012).

В состав чадобецкого комплекса входят ультраосновные щелочные силикатные породы (мелилититы, айлликиты) и карбонатиты. Оцененный возраст мелилититов (U-Pb SHRIMP II, перовскит) равен 252±12 млн. лет, а карбонатитов (Ag-Ag, рипшит) - 231±2.7 млн. лет (Чеботарев и др., 2017). Образование пород совпало по времени с вулcano-магматической активностью на Сибирском кратоне: формированием сибирских траппов (например, Burgess and Bowring, 2015), карбонатитов и щелочных ультраосновных пород провинции Маймеча-Коту (например, Basu et al., 1995; Dalrymple et al., 1995; Когарко Л. Н., Зартман, 2011; Малич и др., 2015; Ghobadi et al., 2018), а также кимберлитов и лампроитов (Врублевский и др., 2005; Carlson et al., 2006; Sun et al., 2014; Васюкова, 2017; Летникова и др., 2014).

Вмещающими породами являются докембрийские и раннекембрийские терригенные и карбонатные осадочные толщи. Интрузии комплекса не выходят на дневную поверхность и перекрыты рыхлыми аллювиальными отложениями

и железистыми латеритами. Породы комплекса сформированы в три фазы внедрения: от ранних щелочно-ультраосновных (щелочные пикриты, мелилититы) до карбонатитов и наиболее поздних айлликитов. Ультраосновные породы и карбонатиты образуют штокообразные массивы (до 2 км в поперечнике), дайки, силлы, залегающие согласно со слоистостью вмещающих осадочных пород (мощность тел от нескольких см до 120 м). Айлликиты слагают многочисленные трубки взрыва, которые имеют секущие контакты по отношению к породам ранних фаз и содержат ксенолиты как ультрабазитов, так и карбонатитов. Все породы комплекса в значительной мере подвергнуты вторичным изменениям (окварцевание, гетитизация, серпенизация и другие) с формированием коры выветривания по ним.

Мелилититы и айлликиты характеризуются низкими содержаниями кремния (до 26 мас.% SiO<sub>2</sub>), обогащены СаО (до 28 мас.%), TiO<sub>2</sub> (до 3,6 мас.%) и имеют высокую Mg# (60-70). Айлликиты содержат больше K<sub>2</sub>O, чем мелилититы, что зависит от количества флогопита. Мелилититы имеют нормативный ларнит > 10%. Айлликиты и мелилититы обогащены LREE, с La/Ybn 33 - 144. Графики нормированных к примитивной мантии содержаний редких элементов для обоих типов пород схожи и показывают значительное обогащение Nb, REE, и отрицательные аномалии K, Pb (рис. 1). Породы имеют концентрации Ni и Cr, которые типичны для примитивных мантийных магм (до 350 ppm Ni, до 700 ppm Cr). Ce/Pb и Nb/U являются переменными, но высокими (6-35 и 34-434, соответственно).

Карбонатиты относятся к кальциокарбонатитам. Слабо измененные карбонатиты характеризуются низким содержанием  $\text{SiO}_2$  (до 3,3 мас.%),  $\text{MgO}$  (до 3 мас.%). Сильно измененные карбонатиты имеют более высокий  $\text{SiO}_2$  (до 65 мас.%), чем слабо измененные карбонатиты. Содержание щелочей ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ -0,1 мас.%) низкие для обоих типов карбонатитов. Породы обогащены LREE (с La/Ybn от 34 до 220), Sr, Ba, Th, U, Nb и другими элементами (рис. 1). По сравнению с меллититами и айликитами, карбонатиты имеют более низкие концентрации Rb, Ta, K, Zr, Hf, Ti, Cг и Ni и более высокое содержание REE и Y.

Щелочные силикатные породы и карбонатиты имеют довольно однородные изотопные составы с диапазоном значений  $\epsilon\text{Nd}$  от +4.2 до +5.3 и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (I) от 0.7024 до 0.7036 (рис. 2), с T (DM) модельным возрастом от 600 до 500 млн. лет. Это указывает на общий относительно однородный умеренно деплетированный мантийный источник. Высокое содержание несовместимых элементов в породах Чуктукона (Sг и Nb, La/Sm отношение) свидетельствуют о пользе того, что вероятный мантийный метасоматический агент имел карбонатный исходный состав. Это подтверждается микроэлементным составом оливина Чадобца (Nosova et al., 2018). Кроме того, обогащение легкими РЗЭ и низкие концентрации тяжелых РЗЭ и Y пород Чуктукона могут указывать на то, что они были сформированы из гранат-содержащего источника при низкой степени частичного плавления. Низкие содержания Rb, K и Pb по сравнению с HFSE и LREE позволяют полагать, что в первичных расплавах элементы буферировались флогопитом в процессе плавления.

Считается, что образование первичных расплавов для ультраосновных лампрофир-карбонатитовых серий происходит в результате частичного плавления метасоматизированного перидотита на глубинах > 150 км (например, Dalton and Presnall, 1998; Downes et al., 2005; Agashev et al., 2008). К сожалению, мы не можем оценить РТ-параметры пород Чуктукона (например, используя оливин и оливин-шпинель), учитывая, что породы значительно изменены, но мы можем

провести аналогию с неизменными породами Териновского массива. Основываясь на редкоэлементном составе оливина (Nosova et al. (2018), расчетные значения температуры и давления составляют 1200° С и 40-60 кбар. Это согласуется с геофизическими данными (Дашкевич, 1999) нахождения границы астеносферы-литосферы на 150-180-километровой глубине под Чадобецким поднятием. Вычисленные  $f\text{O}_2$  для щелочных силикатных пород Чуктукона (согласно Ballhaus et al., 1991) варьируют от FMQ +1.1 до +2.1 log единиц и хорошо согласуются с полученными значениями  $f\text{O}_2$  для меймечитов (Рябчиков и др., 2009).

Важным вопросом является механизм образования карбонатитов Чуктукона. Можно рассмотреть две возможности: (1) первичная карбонатная выплавка, сформированная при частичном плавлении мантийного метасоматизированного источника; (2) продукт силикатно-карбонатной жидкостной несмесимости первичного карбонатизированного силикатного расплава.

Эксперименты по плавлению карбонатизированного перидотита между 3 и 10 ГПа приводят к образованию карбонатитового расплава с низкой степенью частичного плавления; расплавы имеют состав магнезиокарбонатита (например, Dalton and Presnall, 1998; Klemme et al., 1995; Sweeney et al., 1995; Foley et al., 2009; Dasgupta et al., 2009). Поскольку карбонатиты Чуктукона относятся к кальциокарбонатитам, можно исключить возможность первичного происхождения путем частичного плавления карбонатизированного перидотита. Этот вывод также согласуется с геохимическими особенностями карбонатитов, такими как низкие концентрации  $\text{MgO}$ , Cг и Ni.

Возможно, что карбонатиты образовались в результате силикатно-карбонатной жидкостной несмесимости. Подтверждением этого являются рассчитанные коэффициенты распределения (D) концентраций микроэлементов между силикатной и карбонатной породами Чуктукона (рис. 3). D карб/сил для РЗЭ и Ba, Th и U соответствует экспериментальным данным по несмешивающимся силикатной и карбонатной жидкостям (Martin et al., 2012, 2013; Veksler et al., 2012).

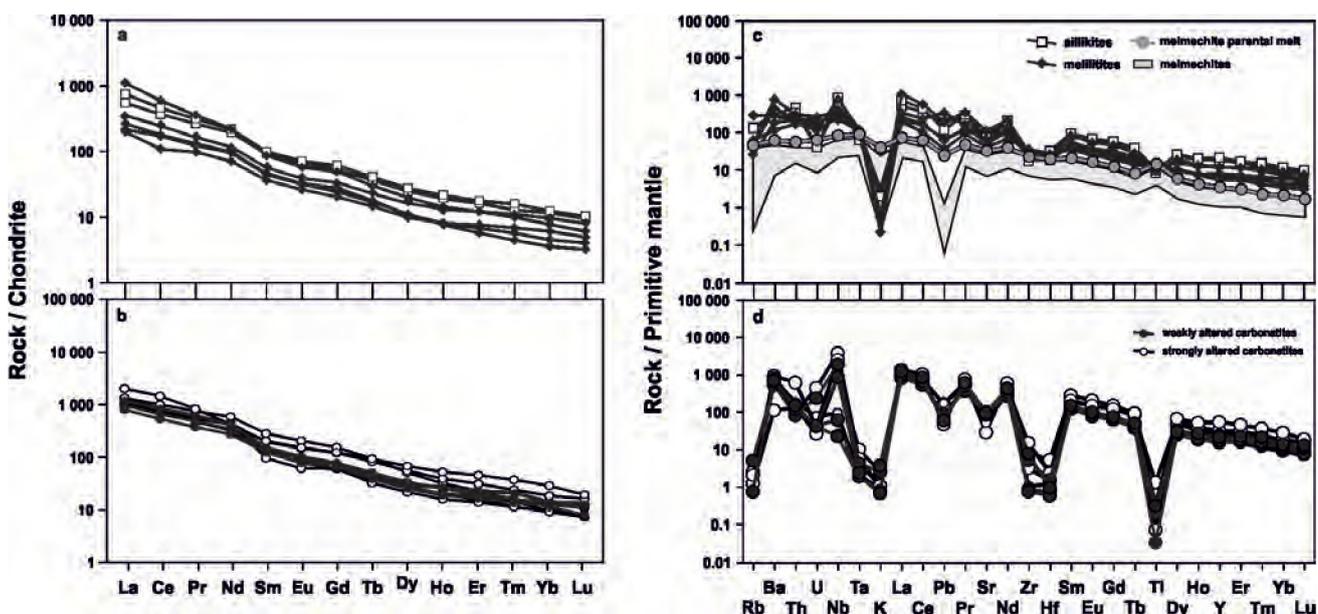


Рис. 1. Графики распределения РЗЭ и редких элементов для пород чуктуконского массива, нормированные к примитивной мантии и хондриту по (Sun, McDonough, 1989). Меймечиты и меймечитовый родительский расплав по (Соболев и др., 2009).

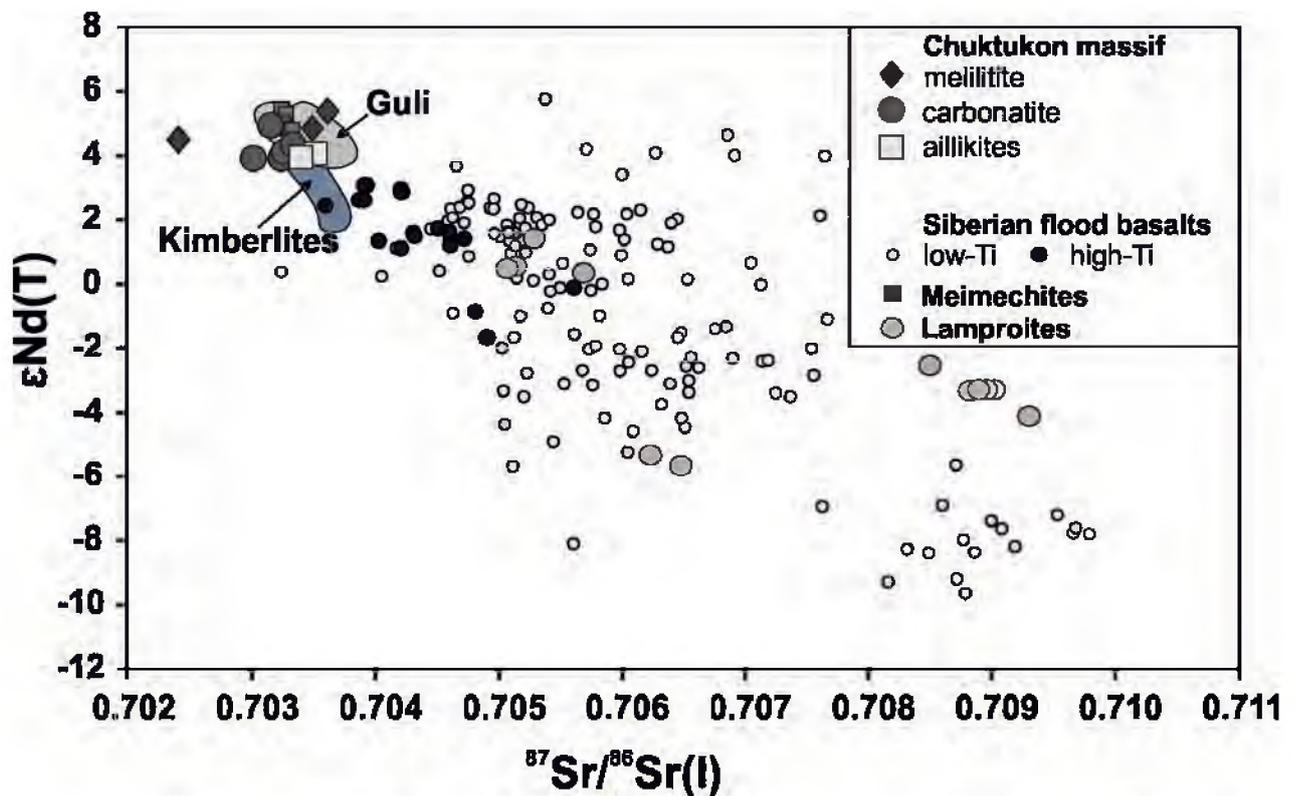


Рис. 2.  $^{87}Sr/^{86}Sr(I)$  vs  $\epsilon Nd(T)$  для пород Чуктуконского массива. Данные для ультраосновных и щелочных пород массива Гули (Козарко и Зартман, 2011), меймечитов и базальтов (Sharma et al., 1992; Wooden et al., 1993; Lighfood et al., 1993; Arndt et al., 1998; Fedorenko et al., 1996; Carlson et al., 2006), триасовые сибирские кимберлиты и лампроиты (Врублевский и др., 2005; Carlson et al., 2006; Sun et al., 2014, Васюкова, 2017).

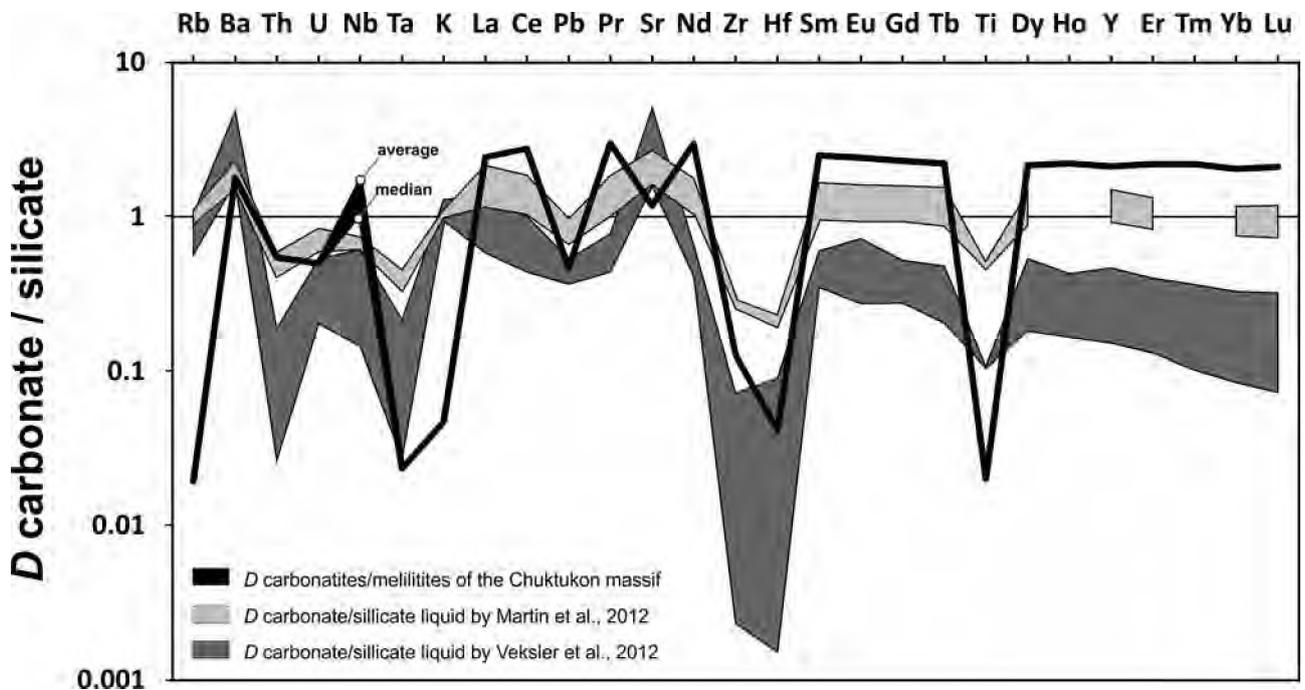


Рис. 3. Коэффициенты распределения ( $D$ ) микроэлементов между карбонатами и мелилитами Чуктукона и сравнение с экспериментально полученными коэффициентами Martin et al. (2012, 2013) и Veksler et al. (2012).

Коэффициенты распределения для K, Rb и Sr являются низкими, что может быть связано с подвижностью элементов в гидротермальном процессе и подтверждается петрографическими наблюдениями. Однако содержание Nb выше, чем в экспериментальных данных. Согласно нашим данным и предыдущим исследованиям (Slukin, 1994; Цыкина, 2003), количество Nb в карбонатах варьирует от первых до тысяч ppm, включая слабо измененные карбонатиты, поэтому, если мы используем медианное значение Nb, получим соответствующее экспериментам значение (рис. 3).

Одновозрастные щелочные породы провинции Маймеч-Коту (меймечиты, щелочные пикриты и породы щелочного карбонатитового комплекса Гули) характеризуются изотопными Sr-Nd значениями схожими с таковыми для пород Чуктукона (рис. 2), что позволяет предполагать, что эти типы магм были получены из единого умеренно деплетированного мантийного источника, расположенного под Сибирским кратоном. Подтверждением этого также являются близкие геохимические характеристики щелочных силикатных пород Чуктукона с породами провинции Маймеч-Коту и рассчитанным первичным меймечитовым расплавом (Соболев и др., 2009) (рис. 1). Некоторые различия в поведении Ba, Rb, K и Pb можно объяснить гидротермальным преобразованием пород Чуктукона, поскольку эти элементы подвижны в гидротермальном процессе.

Некоторые исследователи (Kogarko, Ryabchikov, 2000; Рябчиков и др., 2009) предположили, что первичные меймечитовые магмы были образованы под воздействием мантийного плюма в результате частичного плавления фертильного лерцолита в астеносфере с последующим взаимодействием образованных расплавов с литосферным мантийным материалом (гарцбургит). Соболев с соавторами (Соболев и др., 2009) предложили схожую модель формирования первичного меймечита; разница в том, что метасоматический агент представлял собой силикатно-карбонатный расплав, высвобождаемый из рециклированной океанической коры головки плюма. Сибирские траппы, имеющие пространственную и временную связь с щелочными породами Чуктукона и Маймеч-Коту, также рассматриваются как продукты деятельности мантийного плюма (например, Basu et al., 1995; Arndt et al., 1998; Рябчиков и др., 2009; Соболев и др., 2009). Хотя изотопные данные базальтов значительно отличаются от таковых для пород Чуктукона и Маймеч-Коту (рис. 2) и свидетельствуют в пользу участия континентального литосферного материала в базальтовом источнике (например, Sharma et al., 1992; Lightfoot et al., 1993; Wooden et al., 1993; Fedorenko et al., 1996; Carlson et al., 2006). С другой стороны, составы меймечитов, щелочных пород Гули и Чуктукона лежат на начальной точке линейного тренда Sr-Nd изотопного состава сибирских базальтов, что может свидетельствовать в пользу их генетической связи с Сибирским мантийным плюмом.

Carlson et al. (2006) предположили, что первичные изотопные характеристики меймечитов и пород Гули по сравнению с основными объемами базальтов связаны с их проявлением в краевой части площади максимального излияния траппов. Это предположение согласуется с численным моделированием образования меймечитов при взаимодействии плюма с литосферой Сибирского кратона (Соболев и др., 2009). С другой стороны, как Чуктуконский, так и Теринский массивы Чадобецкого поднятия расположены на значительном расстоянии (более 2500 км) от фокуса максимальной магматической активности. В числовой модели плюмовой активности (Соболев и др., 2009; Sobolev et al., 2011) скорость распространения плюмового материала по границе литосферы составляет около 2000 км/млн. лет, поэтому возможность быстрого поступления плюмового материала в

область проекции места внедрения щелочных пород Чадобецкого поднятия является вполне вероятной. С другой стороны, учитывая высокую температуру плюма (1600–1650°C) и большой объем поступающего эрозийного литосферного материала (Соболев и др., 2009; Sobolev et al., 2011), трудно представить, что первичные расплавы для щелочных пород Чуктукона, мигрирующие на значительные расстояния от фокальной зоны активности плюма могли сохранять исходные изотопные и геохимические характеристики.

Carlson et al. (2006), основываясь на изотопном и геохимическом сходстве между разновозрастными кимберлитами Сибирского кратона и меймечитами, предположили, что образование первичных магм для пород происходило из долгоживущего мантийного источника, возникшего под Сибирским кратоном задолго до триасового излияния траппов. Можно полагать, что этот долгоживущий метасоматизированный мантийный источник был нагрет под воздействием тепла Сибирского плюма, а образование щелочных пород (кимберлитов, пород массивов Гули и Чуктукона) связано с более низкими температурой, степенью частичного плавления и объемом магмы, и более высоким содержанием CO<sub>2</sub> по сравнению с меймечитами. Это хорошо согласуется с исследованиями карбонатитов Гули (Буйкин и др., 2017), которые показали отсутствие благородных газов плюмового типа в их источнике. Кроме того, недавно обнаруженное Ильбокичское проявление ультрамафических лампрофиров раннедевонского возраста, которое расположено в непосредственной близости к Чадобецкому поднятию, характеризуется изотопным составом Sr (0.7033) (Каргин и др., 2016) в том же диапазоне, что и у щелочных пород Чуктукона и Маймеч-Коту. Микроэлементные характеристики оливина пород Ильбокича и Чадобца выявляют незначительную трансформацию литосферной мантии в результате деятельности Сибирской плюма, сопровождающуюся уменьшением флогопитовых метасомов и увеличением карбонатного компонента (Nosova et al., 2018).

*Исследования выполнены по теме базового проекта НИР ИГМ СО РАН № 0330-2016-0002.*

## Литература

1. Буйкин А.И., Когарко Л.Н., Хопш Й., Трилофф М. Данные по изотопному составу легких благородных газов в карбонатитах Гулинского массива выявляют субконтинентальную литосферную мантию, как первичный источник флюидов. *Геохимия*, 2017, № 5, с. 445–452
2. Васюкова Е.А. Петрология и флюидный режим формирования лампрофиров чуйского комплекса, Новосибирск, изд-во СО РАН, 2017, 158 стр.
3. 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 // *Докл. РАН*, 2005, т. 405 (5), с. 658–660.
4. Дашкевич Н.Н. Региональный прогноз кимберлитового магматизма в юго-западной части Сибирской платформы // *Геология и полезные ископаемые Красноярского края*. 1999. с. 31–42.
5. Каргин А.В., Носова А.А., Постников А.В., Чугаев А.В., Постникова О.В., Попова Л.П., Поппибаев В.В., Сазонова Л.В., Докучаев А.Я., Смирнова М.Д. Девонские ультрамафические лампрофиты Иркинское-Чадобецкого прогиба юга-запада Сибирской платформы: возраст, состав и значение для прогноза алмазоносности. *Геология рудных месторождений*, 2016, т. 58 (5), с. 430–450

6. Кириченко В. Т., Зуев В. К., Перфилова О. Ю., Сосновская О. В., Смокотина И. В., Маркович Л. А., Бородин В. П., Миролюбов Е. П. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000. Серия Ангаро-Енисейская Лист О47 – Братск. Объяснительная записка – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012, 470 с.
7. Когарко Л. Н., Зартман Р. Э. Новые данные о возрасте Гулинской интрузии и проблема связи щелочного магматизма Маймеча-Котуйской провинции с Сибирским суперплотом (данные по изотопии U-Th-Pb системы) // *Геохимия*, 2011, №5, с. 462-472.
8. Летникова Е. Ф., Изох А. Э., Николенко Е. И., Похиленко Н. П., Шелестов В. О., Джен Н. (Hilen Geng), Лобанов С. С. Позднеэриасовый этап магматической активности высококалийного трахитового вулканизма северо-востока Сибирской платформы: свидетельства в осадочной летописи // *Доклады академии наук*, 2014, т. 459 (3), с. 1–5.
9. Малич К.Н., Хиллер В.В., Баданина И.Ю., Белоусова Е.А. Результаты датирования ториянита и бадделеита из карбонатитов массива Гули, Россия ДАН, 2015, т. 464 (4), с. 464–467
10. Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н., Соловова И.П. Физико-химические условия магнезиализации в основании сибирского плюма по данным исследования расплавленных включений в меймечитах и щелочных пикритах Маймеча-Котуйской провинции. *Петрология*, 2009, т. 17, с. 311-323.
11. Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами. *Геология и геофизика*, 2009, т. 50 (12), с. 1293–1334
12. Цыкина С.В. Зональность редкометалльного оруденения коры выветривания карбонатитов Чукотского месторождения. *Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири*. Вып. 4 Красноярск, КНИИГиМС, 2003. с.153-158.
13. Чеботарев Д.А., Дорошквич А.Г., Шарьгин В.В., Юдин Д.С., Пономарчук А.В., Сергеев С.А. Геохронология Чукотского карбонатитового массива, Чадобецкое поднятие, Красноярский край. *Геология и геофизика*, 2017, № 10, 1542—1553
14. Agashev, A.M., Pokhilenko, N.P., Takazawa, E., McDonald, J.A., Vavilov, M.A., Watanabe, T., Sobolev, N.V., 2008. Primary melting sequence of a deep (>250km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada. *Chem. Geol.* 255, 317–328
15. Arndt, N., Chauvel, C., Czamanske, G., and Fedorenko, V., 1998. Two mantle sources, two plumbing systems: tholeiitic and alkaline magmatism of the Maymecha River basin, Siberian flood volcanic province. *Contrib. Mineral. Petrol.* 133, 297-313.
16. Ballhaus, C.B., Berry, R.F., Green, D.H., 1991. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen barometer—implications for redox conditions in the Upper mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.* 107, 27–40.
17. Basu, A.R., Poreda, R.J., Renne, P.R., Telchmann, F., Vasiliev, Y.R., Sobolev, N.V., Turrin, B.D., 1995. High-<sup>3</sup>He plume origin and temporal-spatial evolution of the Siberian flood basalts. *Science* 269 (5225), 825–882.
18. Burgess, S.D., Bowring, S.A., 2015. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction. *Sci. Adv.* 1 (7), e1500470.
19. Carlson, R.W., Czamanske, G., Fedorenko, V., Ilupin, I., 2006. A comparison of Siberian meimechites and kimberlites: implications for the source of high-Mg alkalic magmas and flood basalts. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 7 (11).
20. Dalrymple, G.B., Czamanske, G.K., Fedorenko, V.A., Simonov, O.N., Lanphere, M.A., Likhachev, A.P., 1995. A reconnaissance <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronologic study of ore-bearing and related rocks, Siberian Russia. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59 (10), 2071–2083.
21. Dalton, J.A., Presnall D.C., 1998. The continuum of primary carbonatitic-kimberlitic melt compositions in equilibrium with lherzolite: Data from the system CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> at 6 GPa, *J. Petrol.* 39, 1953–1964.
22. Dasgupta, R., Hirschmann, M.M., McDonough, W.F., Spiegelman, M., Withers, A.C., 2009. Trace element partitioning between garnet lherzolite and carbonatite at 6.6 and 8.6 GPa with applications to the geochemistry of the mantle and of mantle-derived melts. *Chem. Geol.* 262, 57–77.
23. Downes, H., Balaganskaya, E., Beard, A.D., Liferovich, R., Demaiffe, D., 2005. Petro-genetic processes in the ultramafic, alkaline and carbonatitic magmatism in the Kola Alkaline Province: a review. *Lithos* 85, 48–75.
24. Fedorenko, V.A., Lightfoot, P.C., Naldrett, A.J., Czamanske, G., Hawkesworth, C., Wooden, J., Ebel, D., 1996. Petrogenesis of the Siberian flood-basalt sequence at Noril'sk, north central Siberia. *Int. Geol. Rev.* 38, 99-135
25. Foley, S.F., Yaxley, G.M., Rosenthal, A., Buhre, S., Kiseeva, E.S., Rapp, R.P., Jacob, D.E., 2009. The composition of near-solidus melts of peridotite in the presence of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O between 40 and 60 kbar. *Lithos* 112, 274–283.
26. Ghobadi, M., Gerdes, A., Kogarko, L., Hoefler, H., Brey, G., 2018. In situ LA-ICPMS Isotopic and Geochronological Studies on Carbonatites and Phoscorites from the Guli Massif, Maymecha-Kotuy, Polar Siberia. *Geochem. Int.* 56 (8), 766–783.
27. Klemme, S., Vanderlaan, S.R., Foley, S.F., Gunther, D., 1995. Experimentally determined trace and minor element partitioning between clinopyroxene and carbonatite melt under upper-mantle conditions. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 133, 439-448.
28. Kogarko, L.N., Ryabchikov, I.D., 2000. Geochemical evidence for meimechite magma generation in the subcontinental lithosphere of Polar Siberia. *J. Asian Earth. Sci.* 18, 195—203.
29. Lightfoot, P. C., Hawkesworth, C. J., Hergt, J., Naldrett, A. J., Gorbachev, N. S., Fedorenko, V. A., and Doherty, W., 1993. Remobilization of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd- and Pb-isotopic evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk district, Siberia. *Contrib. Mineral. Petrol.* 114, 171-188.
30. Martin, L.H.J., Schmidt, M.W., Harnes B., Mattsson, H.B., Ulmer, P., Hametner, K., Günther, D., 2012. Element partitioning between immiscible carbonatite-kamafugite melts with application to the Italian ultrapotassic suite. *Chem. Geol.*, 320-321, 96–112.
31. Martin, L.H.J., Schmidt, M.W., Mattson, H.B., Guenther, D., 2013. Element partitioning between immiscible carbonatite and silicate melts from dry and H<sub>2</sub>O-bearing systems at 1-3 GPa. *J. Petrol.* 54, 2301 - 2338.
32. Nosova, A.A., Sazonova, L.V., Kargin, A.V., Smimova, M.D., Lapin, A.V., Shcherbakov, V.D., 2018. Olivine in ultramafic lamprophyres: chemistry, crystallisation, and melt sources of Siberian Pre- and post-trap aillikites *Contrib. Mineral. Petrol.* 173:55.

33. Sharma, M., Basu, A. R., and Nesterenko, G. V., 1992. Temporal Sr-, Nd-, and Pb-isotopic variations in the Siberian flood basalts: Implications for the plume-source characteristics. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 113, 365-381.
34. Slukin, A.D., 1994. Bauxite deposits with unusually high concentrations of REE, Nb, Ti, and Th, Chadobets uplift, Siberian platform. *Int. Geol. Rev.* 36 (2), 179-193.
35. Sobolev, S.V., Sobolev, A.V., Kuzmin, D.V., Krivolutskaya, N.A., Petrunin, A.G., Arndt, N.T., Radko, V.A., Vasiliev, Y.R., 2011. *Nature* 477, 312–316.
36. Sun, J., Liu, C., Tappe, S., Kostrovitsky, S.I., Wu, F.-Y., Yakovlev, D., Yang, Y.-H., Yang, J.-H., 2014. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from in situ U–Pb and Sr–Nd perovskite isotope analysis. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 404, 283–295.
37. Sun, S.-S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc., London, Special Publ.* 42, 313–345.
38. Sweeney, R.J., Prozesky, V., Przybylowicz, W., 1995. Selected trace and minor element partitioning between peridotite minerals and carbonatite melts at 18–46 kbar pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 3671–3683.
39. Veksler, I.V., Dorfman, A.M., Dulski, P., Kamenetsky, V.S., Danyushevsky, L.V., Jeffries, T., Dingwell, D.B., 2012. Partitioning of elements between silicate melt and immiscible fluoride, chloride, carbonate, phosphate and sulfate melts with implications to the origin of natrocarbonatite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 79, 20-40.
40. Wooden, J.L., Czamanske, G.K., Fedorenko, V.A., Arndt, N.T., Chauvel, C., Bouse, R.M., King, B.-S.W., Knight, R.J., Siems, D.F., 1993. Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, 3677-3704.