



## GEOCHRONOLOGY OF ULTRAMAFIC LAMPROPHYRE DIKES IN THE TOMTOR COMPLEX

S.V. Malyshev <sup>1,2,3✉</sup>, E.A. Gladkochub <sup>1</sup>, A.A. Karimov <sup>1,4</sup>, A.V. Ivanov <sup>1</sup>, A.M. Pasenko <sup>3</sup>,  
A.A. Shalamova <sup>2</sup>, D.R. Sitkina <sup>5</sup>, A.V. Travin <sup>6</sup>, N.V. Bryanskiy <sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb, Saint Petersburg 199034, Russia

<sup>3</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

<sup>4</sup> Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorovskiy St, Irkutsk 664033, Russia

<sup>5</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, 2 Makarova Emb, Saint Petersburg, 199034, Russia

<sup>6</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

**ABSTRACT.** This work studies thin ultramafic lamprophyre (UML) dikes associated with the Tomtor alkaline-ultramafic massif (Arctic Siberia).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating yielded an emplacement age of 710 Ma for the dikes. U-Pb dating of calcite indicates a 400 Ma year old low-temperature recrystallization event. Both age constraints correlate with some notable phases of Tomtor magmatism. The dike locations 15 km away from the main massif suggest a more extensive magmatic province than previously thought. The spatial association of the dikes with the Mesoproterozoic Udzha paleorift highlights the crucial role of inherited tectonic structures in controlling over magmatism. It is probable that the formation of both the dikes and the Tomtor massif was governed by two key factors: (1) favorable lithospheric setting due to the location at the junction of the Archean Daldyn terrane and Paleoproterozoic Khapchan orogenic belt, which is responsible for the localization of the Udzha paleorift; and (2) the reorganization of tectonic stresses within the northern Siberian Craton during the Neoproterozoic and Devonian. The magmatic and consequent recrystallization stages (710 and 400 Ma, respectively) identified within the Udzha paleorift, correspond to major regional geodynamic events, such as Neoproterozoic tectonic convergence in Central Taimyr and Devonian rifting (Vilyui rift system).

**KEYWORDS:** Tomtor; alkaline magmatism; ultramafic lamprophyres;  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating; U-Pb dating; Udzha paleorift; Siberian craton; tectonics; subduction

**FUNDING:** The study was supported by the RSF (grant No. 24-77-10026 – data processing and interpretation, manuscript preparation for publication; grant No. 25-77-30006 – development of method for dating calcite).



EDN: MTEVJO

## RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Sergey V. Malyshev, [s.malyshev@spbu.ru](mailto:s.malyshev@spbu.ru)

Received: September 1, 2025

Revised: October 8, 2025

Accepted: October 14, 2025

**FOR CITATION:** Malyshev S.V., Gladkochub E.A., Karimov A.A., Ivanov A.V., Pasenko A.M., Shalamova A.A., Sitkina D.R., Travin A.V., Bryanskiy N.V., 2026. Geochronology of Ultramafic Lamprophyre Dikes in the Tomtor Complex. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (1), 0874. doi:10.5800/GT-2026-17-1-0874

## ГЕОХРОНОЛОГИЯ ДАЕК УЛЬТРАОСНОВНЫХ ЛАМПРОФИРОВ ТОМТОРСКОГО КОМПЛЕКСА

С.В. Малышев<sup>1,2,3</sup>, Е.А. Гладкочуб<sup>1</sup>, А.А. Каримов<sup>1,4</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>, А.М. Пасенко<sup>3</sup>,  
А.А. Шаламова<sup>2</sup>, Д.Р. Ситкина<sup>5</sup>, А.В. Травин<sup>6</sup>, Н.В. Брянский<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, наб. Университетская, 7/9, Россия

<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

<sup>4</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

<sup>5</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия

<sup>6</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

**АННОТАЦИЯ.** В работе представлены результаты изучения маломощных даек ультраосновных лампрофиров, ассоциированные с Томторским щелочно-ультраосновным массивом (Арктическая Сибирь). Методом  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования установлен возраст формирования даек – 710 млн лет. U-Pb датированием по кальциту установлен возраст низкотемпературной перекристаллизации – 400 млн лет. Оба возрастных рубежа коррелируют с известными фазами томторского магматизма. Расположение даек в 15 км от основного массива свидетельствует о более обширной области проявления магматизма, чем считалось ранее. Пространственная приуроченность даек к мезопротерозойскому Уджинскому палеорифту подчеркивает ключевую роль унаследованных тектонических структур в контроле магматизма. Возможно, формирование даек и самого Томторского массива контролировалось двумя ключевыми факторами: (1) литосферной предрасположенностью, связанной с положением в зоне сочленения архейского Далдынского террейна и палеопротерозойского Хапчанского орогенного пояса, что обусловило локализацию Уджинского палеорифта; и (2) реорганизацией тектонических напряжений в пределах севера Сибирского кратона в неопротерозое и девоне. Выявленные этапы магматизма и последующей перекристаллизации в пределах Уджинского палеорифта (710 и 400 млн лет) соответствуют ключевым геодинамическим событиям в регионе, включая неопротерозойские конвергентные обстановки на Центральном Таймыре и девонский рифтогенез (Вилюйская рифтовая система).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Томтор; щелочной магматизм; ультраосновные лампрофиры;  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование; U-Pb датирование; Уджинский палеорифт; Сибирский кратон; тектоника; субдукция

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследование проведено при поддержке РФФИ (грант № 24-77-10026 – обработка, интерпретация материалов и подготовка публикации; грант № 25-77-30006 – разработка методики датирования кальцита).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В среднем неопротерозое (поздний тоний – ранний криогений) происходит распад суперконтинента Родиния, который начинается ~750 млн лет назад с рифтинга между Западной Лаврентией и австрало-антарктическими блоками [Meridith et al., 2017; Cao et al., 2024]. Отделение Сибирского кратона от Лаврентии фиксируется ~720 млн лет назад крупным магматическим событием Франклин, с которым связано внедрение серии интрузий основного состава, распространенных на южной окраине Сибири и объединенных в Иркутскую магматическую провинцию [Ernst et al., 2023]. После отделения Сибири от Лаврентии на южной окраине Сибири сохраняется обстановка растяжения и по всей окраине внедряется серия щелочных и карбонатитовых массивов в интервале 660–560 млн лет назад [Prokopyev et al., 2024, и ссылки в этой работе].

Северо-западная часть кратона (Центрально-Таймырская зона) на момент распада Родинии являлась активной окраиной [Vernikovskiy et al., 2004; Priyatkina

et al., 2017], а в кратонной части происходило внедрение интрузий первой фазы щелочно-карбонатитового массива Томтор (~700 млн лет назад) [Vladykin et al., 2014], что немного раньше, чем внедрение серии щелочных массивов южной части кратона. Несмотря на то, что внедрение и Томторского, и щелочных массивов юга Сибирского кратона традиционно связывают с распадом Родинии, для формирования каждого из них могут быть более локальные и частные причины. Кроме того, массив Томтор интересен еще тем, что вторая фаза внедрения приходится на время девонской активизации внутриплитного магматизма на Сибирской платформе [Vladykin et al., 2014; Okrugin, Tolstov, 2017; Skublov et al., 2020].

Происхождение ультраосновных щелочных и карбонатитовых комплексов остается важным вопросом глобальной магматической геодинамики, поскольку такие системы фиксируют взаимодействие литосферы и глубинных мантийных резервуаров. Они служат индикаторами масштабов литосферного метасоматоза, состава

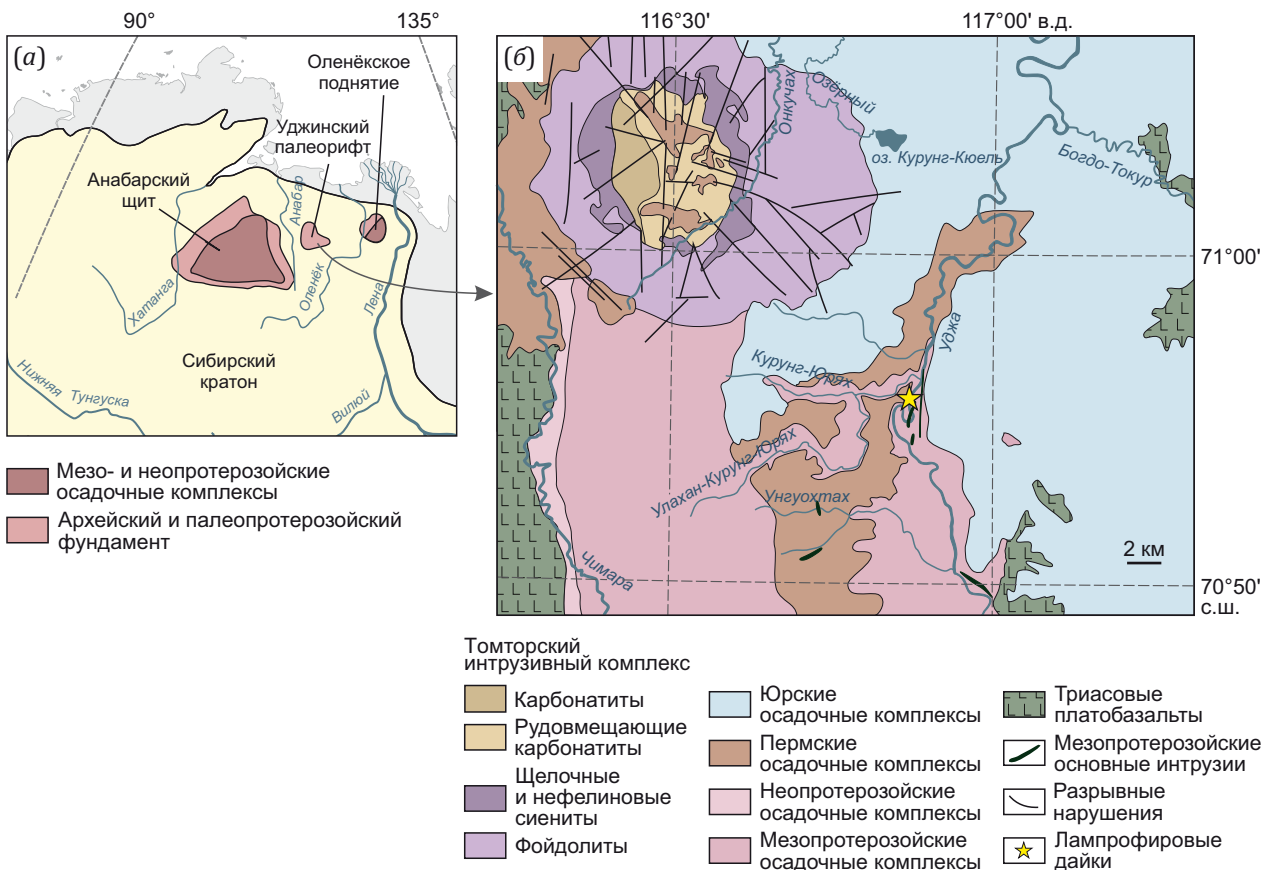
источников плавления и механизмов внутриплитной активизации. Обсуждаемые в литературе триггеры внедрения – мантийные плюмы [Bell, 2001], деламинация литосферы [Doroshkevich et al., 2022], рифтинг или тектоническое ослабление континентальной коры [Moore et al., 2008; Tappe et al., 2017]. На этом фоне массив Томтор, имеющий две разновозрастные фазы магматизма и удаленные щелочно-ультрасосновные дайки, представляет редкую возможность оценить долговременную эволюцию литосферы и причины эпизодического подъема щелочных магм.

Томторский массив является уникальным по содержанию Nb и редкоземельных элементов (РЗЭ) и хорошо изучен в аспекте петрологии [Okrugin et al., 2019, и ссылки в этой работе]. В результате предшествующих петрохимических и геохронологических исследований [Tolstov, 1994; Vladykin et al., 2014; Okrugin, Tolstov, 2017; Skublov et al., 2020] установлены две фазы внедрения массива: ~700 и ~400 млн лет. Авторами настоящей статьи была обнаружена серия маломощных даек щелочных ультрасосновных пород приблизительно в 15 км юго-восточнее массива Томтор, в 2 км от впадения в руч. Курунг-Юрях в р. Уджа (рис. 1). Об-

наруженные дайки секут унгуохтахскую свиту мезопротерозойского возраста. Для четырех даек в рамках данной работы было проведено изотопно-геохронологическое исследование по флогопиту и кальциту для установления их связи с массивом Томтор. Получены два значения возраста – 706.1±8.8 (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar по флогопиту) и ~400 млн лет (U-Pb по кальциту). Обнаруженные дайки одновозрастны с фазами внедрения массива Томтор и указывают на более широкое распространение томторского магматизма в регионе, что свидетельствует о специфических свойствах строения литосферы Уджинского поднятия.

## 2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УДЖИНСКОГО ПОДНЯТИЯ И ТОМТОРСКОГО МАССИВА

Уджинская структура (или Уджинский палеорифт) расположена в северной части Сибирского кратона между Оленёкским поднятием и Анабарским щитом и представляет собой линейно вытянутую в субмеридиональном направлении структуру растяжения – авлакоген, который прослеживается от северной окраины в глубь Сибирской платформы (рис. 1). Структурный



**Рис. 1.** Сибирский кратон с докембрийскими тектоническими элементами и осадочными бассейнами по [Khudoley et al., 2015] (a) и схематическая геологическая карта Уджинского поднятия с Томторским щелочным массивом с указанием места отбора проб [Geological Map..., 1965; Okrugin, Tolstov, 2017] (б).

**Fig. 1.** The Siberian craton with Precambrian tectonic elements and sedimentary basins after [Khudoley et al., 2015] (a) and schematic geological map of the Udzhinskaya uplift (with the Tomtor alkaline massif) showing the sampling site after [Geological Map..., 1965; Okrugin, Tolstov, 2017] (b).

план Уджинского авлакогена устанавливается в основном по геофизическим данным и данным бурения [Prokopyev et al., 2001; Okhlopkov et al., 1987], и считается, что он представляет собой слепую ветвь трехлучевой рифтовой системы. Рифтогенная природа Уджинской структуры также подтверждается широким распространением в разрезе магматических пород, представленных как вулканическими покровами, так и интрузивными телами, которые перекрываются осадочными толщами вендского возраста. Довендская часть разреза Уджинского палеорифта представлена четырьмя свитами (снизу вверх по разрезу): улахан-курунградской, унгуохтахской, хапчаньрской, уджинской [Shpunt et al., 1976]. Возрастное ограничение данной части разреза получено по возрасту молодых зерен циркона из вулканогенно-осадочной унгуохтахской свиты –  $1469 \pm 16$  млн лет [Malyshev et al., 2022] и возрасту долеритовой интрузии – Большой Уджинской дайки, которая прорывает весь рифейский разрез и перекрыта венд-кембрийским осадочным чехлом, –  $1386 \pm 30$  млн лет [Malyshev et al., 2018]. Данный возрастной интервал (1469–1380 млн лет) интерпретируется как максимальное время существования Уджинского рифтового бассейна, а дата  $1469 \pm 16$  млн лет – как время инициации палеорифта.

На западном своде Уджинского поднятия располагается щелочно-карбонатитовый Томторский массив. Он имеет концентрически-зональное строение, центральная часть сложена карбонатитовым ядром, окаймленным мощной неполнокольцевой фойдитовой оторочкой, а большую часть периферии массива составляют щелочные и нефелиновые сиениты [Okrugin et al., 2019]. Основные черты геологического строения массива и возможные условия его образования обсуждаются во многих ранних и современных работах [Okrugin, Tolstov, 2017, и ссылки в этой работе]. Томтор, по всей видимости, не единственный щелочной объект в районе Уджинского поднятия – севернее от Томторского массива находится второе подобное тело – массив Богдо. Аэрофизические исследования указывают на вероятность залегания под пермскими и мезокайно-

зойскими породами Лено-Анабарского прогиба еще трех скрытых массивов: Чюэмпинского (р. Уджа), Буолкалахского и Уэлинского [Porshnev, Stepanov, 1981]. Согласно исследованиям [Epshtein et al., 1994], данные комплексы ультрамафитов, ийолитов и карбонатитов образуют Восточно-Прианабарскую докембрийскую щелочно-карбонатитовую провинцию, хотя возраст перечисленных массивов никогда не определялся радиометрическими методами. По мнению авторов [Epshtein et al., 1994], она аналогична Западно-Прианабарской щелочно-карбонатитовой провинции раннемезозойского возраста, расположенной на западном и юго-западном флангах Анабарского щита.

Б.Р. Шпунт с соавторами [Shpunt et al., 1991] описали вулканогенные породы щелочно-ультраосновного состава, близкие по составу к мелким секущим телам Томторского массива на водоразделах рек Чимара и Эбелях, Томтор и Токур-Уджа. В результате был сделан вывод, что эти покровы являются краевой частью ранее единой вулканоплутонической постройки Томтор. Еще первые исследователи [Geological Map..., 1965] во время геологической съемки определили Томтор как вулканоплутонический комплекс, а по первым K-Ar и Rb-Sr изотопным датировкам была предложена трехэтапная последовательность формирования Томторского массива [Zaitsev et al., 1992; Entin et al., 1990].

Современные геохронологические U-Pb и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  исследования [Vladykin et al., 2014; Okrugin, Tolstov, 2017; Skublov et al., 2020] (табл. 1) пород Томторского массива показывают следующие оценки возраста: щелочной сиенит –  $689 \pm 5$  млн лет, карбонатиты 1-го этапа –  $693 \pm 8$  и  $681 \pm 6$  млн лет, лампроиты –  $412 \pm 2$  млн лет и рудоносный карбонатит 2-го этапа –  $400 \pm 4$  млн лет. Для флогопита, выделенного из пикрита в южной части диатремы,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом получен возраст  $371 \pm 4$  млн лет [Okrugin, Tolstov, 2017]. Недавние результаты датирования циркона из сиенитов и камафоритов Томтора U-Pb методом [Skublov et al., 2020] указывают на то, что основная популяция циркона имеет возраст  $402 \pm 7$  млн лет, а единичные зерна попадают в возрастной интервал 700–660 млн лет. Возраст циркона

**Таблица 1.** Геохронологическая изученность массива Томтор

**Table 1.** Geochronological understanding of the Tomtor massif

Порода и минерал-геохронометр	Метод	Возраст, млн лет	Источник
Щелочной сиенит, циркон	U-Pb, ID TIMS	$689 \pm 5$	
Биотит из карбонатита	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$693 \pm 8$	
Биотит из карбонатита	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$681 \pm 6$	[Vladykin et al., 2014]
Рудный фосфатно-карбонатный туф, циркон	U-Pb, ID TIMS	$394 \pm 7$	
Биотит из лампроитов	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$412 \pm 2$	
Биотит из рудного карбонатита	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$400 \pm 4$	
Сиенит, циркон	U-Pb, SIMS (SHRIMP II)	$402 \pm 7$	[Skublov et al., 2020]
Флогопит из дайки ультраосновного состава	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$379 \pm 3$	[Okrugin, Tolstov, 2017]

из камафоритов составляет ~400 млн лет, что соответствует поздней фазе внедрения.

В результате полевых работ 2016–2020 гг. авторами статьи (С.В. Малышев, А.В. Иванов, А.М. Пасенко, А.А. Шаламова) были обнаружены и исследованы мелкозернистые маломощные дайки ультраосновных лампрофиров, обнажающиеся на левом берегу русла р. Уд-жа выше устья р. Улахан-Курунг-Юрях (70.931333° с.ш., 116.875139° в.д.; рис. 2). Эти дайки расположены примерно в 15 км от Томторского массива и секут туфогенно-терригенные породы унгуохтахской свиты. Они представлены четырьмя тонкими субвертикальными телами мощностью от 7 до 20 см, расположенными на расстоянии 1–5 м друг от друга (рис. 2), и видимой протяженностью в пределах обнажения до 20–30 м. Контакты со вмещающими породами резкие, имеют неправильную форму, на многих видны пальцы и апофизы. Зона закалки во вмещающих породах практически отсутствует. Возможно, все дайки являются краевыми апофизами крупного питающего интрузива, которые не вскрыты в обнажении. Данные дайки были опробованы (образцы D1-D4 в соответствии с номером дайки) для определения возраста Ar-Ar и U-Pb методами.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАЗЦОВ

Все четыре дайки представлены темно-серыми массивными породами с большим количеством вкрапленников (до 30–40 об. %), структура пород порфировидная. В качестве вкрапленников выступают изометричные кристаллы оливина до 500 мкм (рис. 3, в), вытянутые кристаллы диопсида до 300 мкм (рис. 3, г), амфибола 200–300 мкм (рис. 3, б) и чешуйчатого флогопита 100–200 мкм (рис. 3, а). Кристаллы оливина и

диопсида почти полностью замещены карбонатами, иногда содержат включения акцессорной угловатой хромшпинели (рис. 3, в, г). Карбонатные минералы представлены преимущественно кальцитом (рис. 4, а, б). Амфибол и флогопит распределены по породе крайне неравномерно и могут полностью отсутствовать. Из акцессорных минералов встречаются идиоморфные хромшпинель (см. рис. 3, г) и апатит (рис. 4, а). Основная масса представлена смесью слюдястых минералов, серпентина и хлорита, сцементированной матрицей ксеноморфных минералов карбонатного состава (Ca, Mg, Fe). Вследствие того, что кальцит практически полностью замещает минералы-вкрапленники (оливин и диопсид), а также является одним из основных минералов основной массы, его количество составляет до 30–40 об. % породы.

Данные по составу петрогенных, редких и рассеянных элементов представлены в табл. 2. Для исследуемых пород характерны высокие содержания MgO (до 7.5 мас. %) и CaO (до 31 мас. %) при одновременно низком SiO<sub>2</sub> (~18–22 мас. %). По соотношению суммарной щелочности и содержащегося кремнезема составы даек соответствуют умереннощелочным породам, по типу щелочности изучаемые породы являются ультракалиевыми (K<sub>2</sub>O 0.85–2.29 мас. %; Na<sub>2</sub>O <0.1–0.2 мас. %). Однако следует учитывать вероятные потери натрия.

Согласно классификации изверженных пород [Le Maitre, 2002], петрографическим и петрохимическим характеристикам изучаемые дайки можно отнести к ультраосновным лампрофирам (UML), а согласно уточненной классификации [Tappe et al., 2005] – к их айликитовым разновидностям. Эти породы распространены в регионах проявления литосферного растяжения

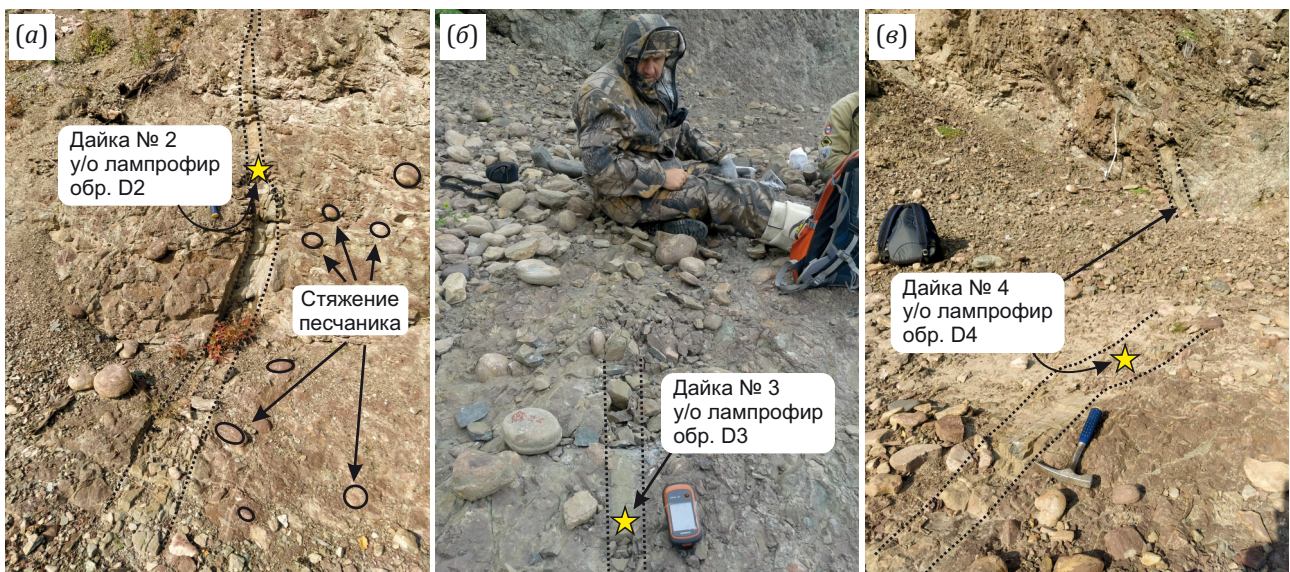
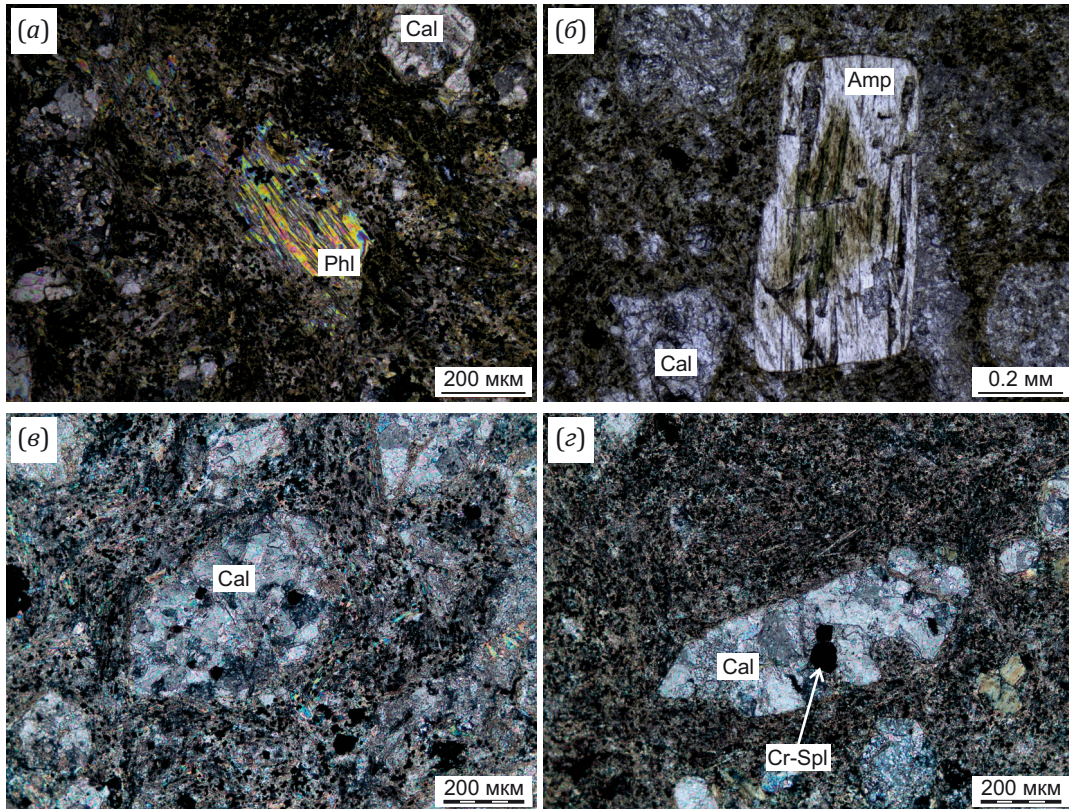


Рис. 2. Обнажение унгуохтахской свиты и прорывающих ее ультраосновных лампрофировых даек с указанием мест отбора образцов. (а) – обр. D2; (б) – обр. D3; (е) – обр. D4.

Fig. 2. Outcrop of the Unguokhtakh formation, intersected by ultramafic lamprophyre dikes, with the sampling sites. (a) – sample D2; (б) – sample D3; (e) – sample D4.

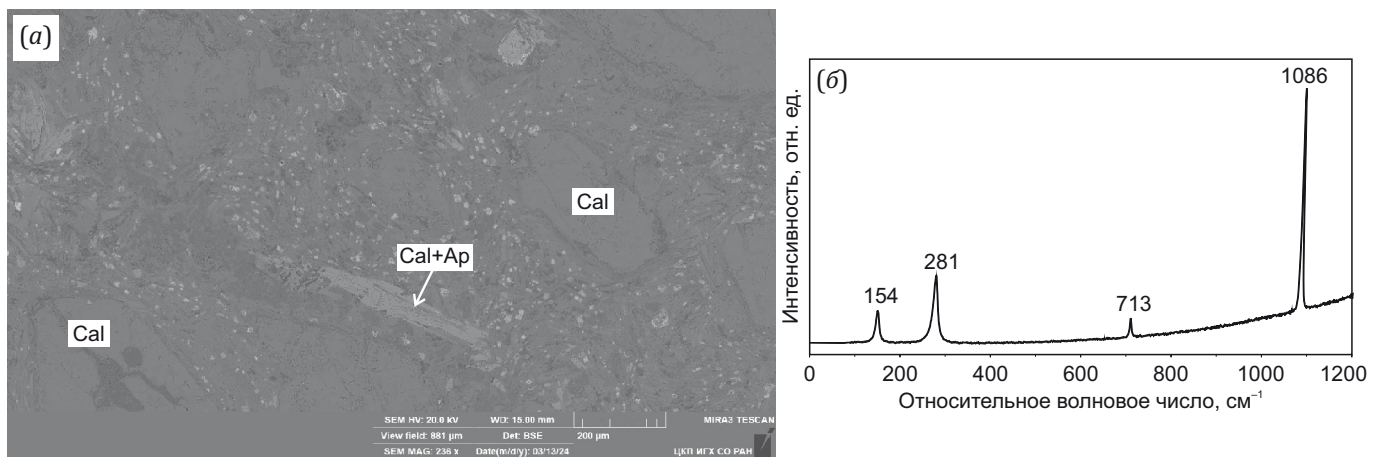


**Рис. 3.** Изображения шлифов, поляризатор включен.

(а) – обр. D3, вкрапленник флогопита в основной массе; (б) – обр. D2, вкрапленник амфибола рядом с крупными кристаллами кальцита и основной массой; (е) – обр. D1, вкрапленник оливина, замещенный кальцитом; (z) – вкрапленник диопсида с включением идиоморфной хромшпинели, замещенный кальцитом. Phl – флогопит, Cal – кальцит, Amp – амфибол, Cr-Spl – хромшпинель.

**Fig. 3.** Thin section images, the polarizer is switched on.

(а) – sample D3, phlogopite phenocryst in a groundmass; (б) – sample D2, amphibole phenocryst near large calcite crystals and a groundmass; (е) – sample D1, olivine phenocryst replaced by calcite; (z) – calcite-replaced diopside phenocryst with inclusion of euhedral chromian spinel. Phl – phlogopite, Cal – calcite, Amp – amphibole, Cr-Spl – chromian spinel.



**Рис. 4.** (а) – микрофотография в обратнорассеянных электронах поверхности образца D4. Cal – кальцит, Ap – апатит. Измерения выполнены при помощи электронного микроскопа Tescan Mira 3 LMN в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» (ИГХ СО РАН, г. Иркутск). (б) – типичный спектр комбинационного рассеяния света (КРС) кальцита, измерения выполнены на системе КРС-спектроскопии WITec Alpha 300R с лазером 532 нм в ЦКП «Геодинамика и геохронология» (ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

**Fig. 4.** (а) – a back-scattered electron image of sample D4 surface. Cal – calcite, Ap – apatite. Measurements are performed using scanning electron microscope Tescan Mira 3 LMN hosted by SRF of Isotopic and Geochemical Research (Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk). (б) – a typical Raman spectrum of calcite recorded on WITec Alpha 300R spectrometer with a 532 nm laser, Centre for Geodynamics and Geochronology (IEC SB RAS, Irkutsk).

**Таблица 2.** Содержания петрогенных элементов (мас. %) в исследуемых образцах № D1-D4)  
**Table 2.** Major element compositions (wt. %) of the studied samples (№ D1-D4)

Образец	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	L.O.I.
D1	21.94	1.71	5.64	7.77	0.36	6.2	28.3	0.75	<0.1	1.22	24.88
D2	20.84	1.71	5.88	10.25	0.33	7.41	25.69	0.76	<0.1	0.85	24.18
D3	18.36	1.67	5.81	7.81	0.37	5.84	31.07	0.73	<0.2	2.19	25.59
D4	19.19	1.75	5.92	8.05	0.45	7.48	26.72	0.85	<0.1	2.29	24.76

Примечание. Данные рентгенофлуоресцентного анализа получены в ЦКП «Геодинамика и геохронология» (ИЗК СО РАН, г. Иркутск; аналитик Г.В. Пашкова).

Note. X-ray fluorescence data are obtained at the Centre for Geodynamics and Geochronology (IEC SB RAS, Irkutsk; analyst G.V. Pashkova).

и обычно образуются на ранних стадиях внутриконтинентального рифтогенеза и ассоциируют с карбонатами [Savel'yeva et al., 2024]. Кроме того, на завершающих магматических этапах образования даек UML может происходить замещение первичных вкрапленников оливина и клинопироксена кальцитом и серпентином, как было, например, показано в работе [Nosova et al., 2021]. Таким образом, кальцит основной массы и замещающий вкрапленники мы относим к позднемагматическому этапу формирования изучаемых даек UML.

Образец D3 был отобран для датирования <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar методом, в образцах D1-D4 U-Pb методом (LA-ICP-MS) были впервые продатированы крупные (>110 мкм) кристаллы кальцита, замещающие вкрапленники оливина и диопсида.

#### 4. МЕТОДИКА ДАТИРОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

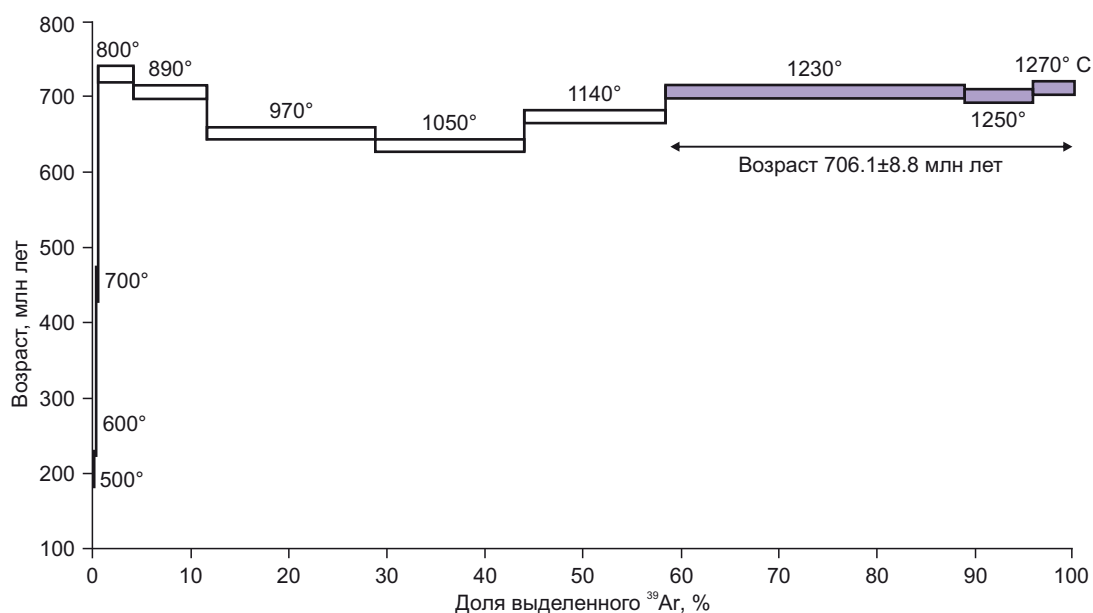
**<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar изотопный анализ.** Данный анализ проводился в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск, Россия) с использованием кварцевой индукционной печи и масс-спектрометра MC5400.

Флогопит, выделенный из образца D3, анализировали в 11 ступеней от 500 до 1270 °C (рис. 5; табл. 3). Возрастной спектр начинается с лестничной формы, а затем переходит в седловидную, отражающую сложную частичную потерю радиогенного аргона в анализируемых зернах флогопита. Три ступени при самых высоких температурах между 1230 и 1270 °C дают равные в пределах аналитических ошибок значения возраста со средним 706.1±8.8 (2σ) млн лет. На эти три ступени приходится 41.6 % выделившегося <sup>39</sup>Ar, и, вероятно, их возраст близок ко времени кристаллизации флогопита.

**U-Pb изотопный анализ кальцита.** U-Pb датирование кальцита из ультраосновных лампрофировых даек (образцы D1-D4) выполнено методом лазерной абляции (ЛА) с масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в ЦКП «Геодинамика и геохронология» (ИЗК СО РАН, г. Иркутск). Для датирования использовалась связка приборов: эксимерный лазер Analyte Excite с длиной волны 193 нм, снабженный двух-

объемной ячейкой HelEx II, и квадрупольный масс-спектрометр Agilent 7900. Абляция осуществлялась в потоке He (несущий газ – 0.5 л/мин в первом объеме ячейки, добавочный – 0.2 л/мин через второй объем абляционной ячейки), пятно абляции лазера составляло 110 мкм при частоте излучения 10 Гц и плотности энергии 1.73 Дж/см<sup>2</sup>. Перед поступлением в горелку масс-спектрометра гелий с образцом подмешивался к потоку аргона (0.920 л/мин) в Т-образном кварцевом смесителе оригинальной конструкции. Каждый анализ начинался с измерения фона (20 с), непосредственно измерение составляло 40 с, после чего 40 с отводилось на очистку системы перед следующим измерением. Измерялись следующие изотопы (в скобках приведена выдержка в мс): <sup>43</sup>Ca (0.009), <sup>206</sup>Pb (0.1), <sup>207</sup>Pb (0.15), <sup>232</sup>Th (0.0375) и <sup>238</sup>U (0.15). Для учета эффектов масс-дискриминации использовалось синтетическое стекло SRM NIST-610, для которого известны изотопные отношения свинца по данным изотопного разбавления и масс-спектрометрии с термической ионизацией (ИР-ТИМС) [Stern, Amelin, 2003]. Корректировка на U-Pb масс-фракционирование осуществлялась при помощи стандарта кальцита Tarim с известным возрастом, определенным методом ИР-ТИМС (208.5±0.6 млн лет [Zhang et al., 2023]). В качестве вторичного (проверочного) стандарта использовался мегакристалл кальцита из жезоды в осадочных карбонатных слоях в районе Уши, северо-запад бассейна TARIM, Китай. Полная серия измерений состояла из 50 циклов, начинающихся с измерений SRM NIST 610, Tarim, и заканчивающихся измерениями четырех неизвестных проб. Редукция данных выполнялась в программном комплексе Iolite 4.10.5 [Paton et al., 2010, 2011], построение графиков с конкордией – в программном комплексе IsoplotR [Vermeesch, 2018].

Все проанализированные макрокристы кальцита в координатах Тера-Вассербурга (рис. 6, а–д) формируют линии регрессии, нижние пересечения которых с конкордией соответствуют возрасту ~400 млн лет. Все четыре образца имеют близкий начальный состав свинца (<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb), что позволяет рассчитать композитный возраст по всем проанализированным точкам. Среднее значение четырех датировок составляет 395 ±20 млн лет (рис. 6, д).



**Рис. 5.** Спектр ступенчатого нагревания  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  для образца флогопита D3. Ширина поля равна  $1\sigma$ . Ошибка среднего возраста трех самых высоких температурных ступеней составляет  $2\sigma$ . Исходные данные представлены в табл. 3.

**Fig. 5.** Stepwise-heating ( $A$ )  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectrum for phlogopite sample D3. Box width is  $1\sigma$ . The mean age error for the three highest temperature steps is  $2\sigma$ . Raw data are presented in Table 3.

**Таблица 3.** Данные  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  изотопного анализа зерен флогопита Томторского массива (обр. D3)

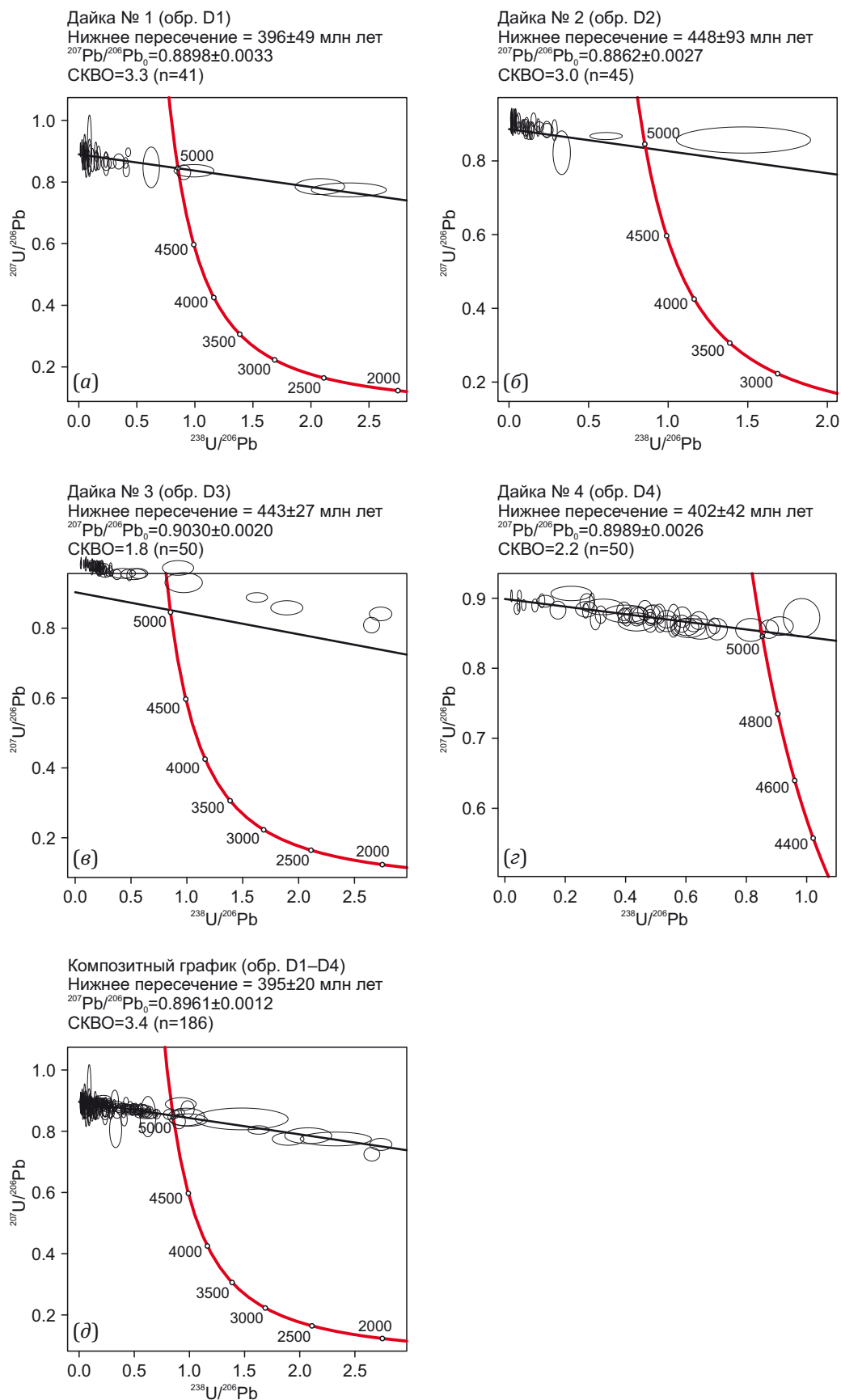
**Table 3.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  isotopic data for phlogopite grains from the Tomtor Massif (sample D3)

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm\sigma$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm\sigma$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm\sigma$	$^{39}\text{Ar}_{\text{cum}}, \%$	Возраст, млн лет	$\pm\sigma$
500	430.25	14.67	0.1673	0.0357	1.3554	0.0486	0.2	211.7	30.6
600	170.16	7.44	0.1323	0.0287	0.4526	0.0266	0.4	255.9	36.2
700	392.30	10.13	0.1279	0.0156	1.0980	0.0312	0.7	451.0	25.1
800	148.47	1.47	0.0131	0.0060	0.0996	0.0038	4.2	729.5	10.5
890	123.13	0.84	0.0114	0.0056	0.0298	0.0024	11.8	705.5	8.5
970	107.38	0.33	0.0181	0.0029	0.0120	0.0010	28.8	651.2	6.5
1050	102.87	0.42	0.0148	0.0033	0.0073	0.0018	44.1	634.6	7.0
1140	110.24	0.42	0.0195	0.0031	0.0070	0.0013	58.4	673.8	7.0
1230	115.66	0.66	0.0135	0.0012	0.00421	0.00059	89.1	706.0	7.4
1250	117.62	0.22	0.0149	0.0015	0.0140	0.0024	95.9	701.2	7.6
1270	117.23	0.26	0.0071	0.0021	0.0060	0.0025	100	711.3	7.7

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ

**Геохронология ультраосновных лампрофировых даек.** В результате датирования флогопита и кальцита маломощных ультраосновных лампрофировых даек получено два возраста –  $706 \pm 9$  (см. рис. 4,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) и  $395 \pm 20$  млн лет (рис. 6, а, д; U-Pb ЛА-ИСП-МС). Возраст  $706 \pm 9$  млн лет, полученный по флогопиту, показывает время внедрения даек. Второе значение возраста, полученное по кальциту, по-видимому, отражает позднемагматическую стадию формирования ультраосновных лампрофировых даек и маркирует замещение кальцитом первичного оливина и клинопироксена под действием гидротермальных растворов во время внедрения второй фазы Томторского массива.

Последующая перекристаллизация в девонский период затронула исключительно кальцит, о чем свидетельствует сохранность изотопной системы аргона во флогопите. Вероятно, это был низкотемпературный гидротермально-метасоматический процесс, сопровождавшийся гомогенизацией отношений  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  и привнесом урана в кальцит, что типично для восстановительных низкотемпературных условий [Zhang et al., 2020]. Совокупность полученных датировок демонстрирует, что область распространения томторских магм первого (криогенного) этапа и проявлений второго этапа (ранний девон) существенно превышает границы собственно Томторского интрузивного массива.



**Рис. 6.** Результаты U-Pb изотопного анализа кальцита из даек D1-D4 с использованием LA-ICP-MS. Диаграмма построена в программе IsoplotR [Vermeesch, 2018].

**Fig. 6.** Results of U-Pb LA-ICP-MS isotopic dating of calcite from dikes D1-D4. The diagram was plotted using IsoplotR [Vermeesch, 2018].

**Природа карбонатитового магматизма северной части Сибирского кратона.** Распространение щелочных и карбонатитовых массивов на севере Сибирского кратона может быть более обширным, что косвенно подтверждается наличием щелочных ультрамафитов севернее р. Удза, погребенных под палеозойско-мезозойский осадочный чехол [Porshnev, Stepanov, 1981; Epshtein et al., 1994]. Основные два вопроса, обсуждаемые в литературе в контексте причин внедрения Томторского массива, сводятся к следующим: почему именно в данном месте земной коры произошло двухэтапное внедрение щелочно-карбонатитовых магм с интервалом в 300 млн лет и чем вызваны оба этапа томторского магматизма.

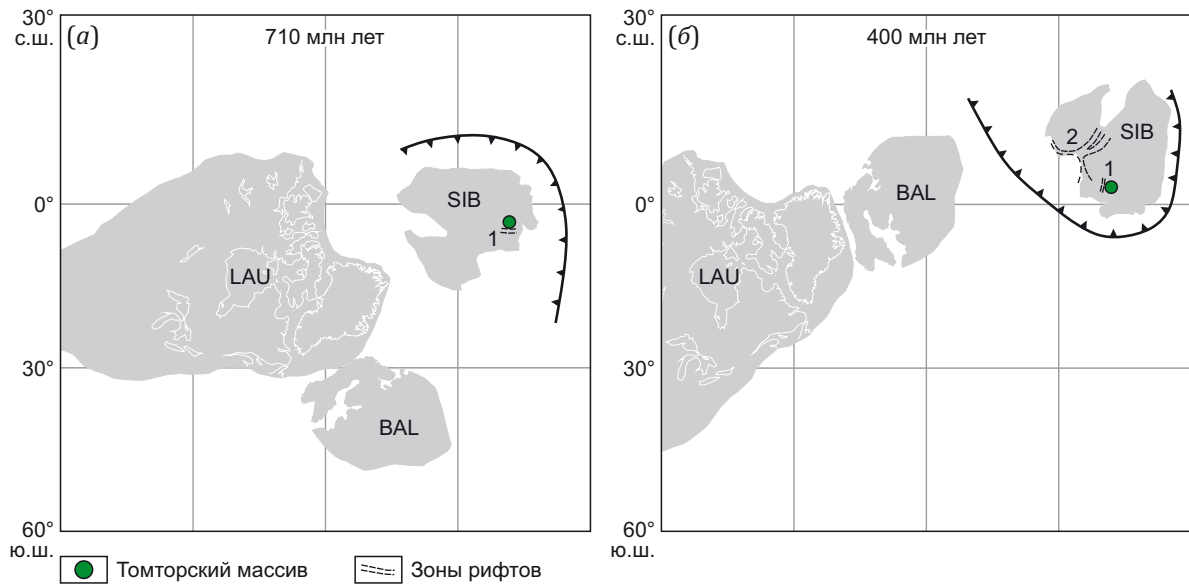
Оба вопроса традиционно объясняются в рамках концепции функционирования мантийного плюма. В ряде работ первая фаза томторского магматизма объясняется распадом суперконтинента Родиния и, в частности, плюмовой активностью, ответственной за магматизм нерсинского комплекса и провинции Франклина [Ernst et al., 2016, 2023; Vladykin et al., 2014; Yarmolyuk et al., 2005]. С другой стороны, позднедокембрийский щелочной магматизм юга Сибирского кратона намного моложе Нерсинского события, что не укладывается в рамки единого процесса. Альтернативная точка зрения на происхождение неопротерозойских щелочных комплексов юга Сибирского кратона сводится к деламинации древней литосферы [Doroshkevich et al., 2022, 2024].

Вторая фаза, судя по ряду публикаций, обусловлена девонским внутриплитным магматизмом на Сибирской платформе, который привел к формированию Вилюйского и Сетте-Дабанского рифтов [Vladykin et al., 2014; Kiselev et al., 2012], а также обширных кимберлитовых полей на Сибирской платформе [Kostrovitsky, Yakovlev, 2022]. По-видимому, ответы на поставленные вопросы действительно взаимосвязаны. В данной работе мы предлагаем альтернативное объяснение причин щелочного и карбонатитового магматизма на севере Сибири с учетом современных представлений по данному вопросу.

Карбонатиты образуются в результате частично-го плавления карбонатизированного перидотита низкой степени плавления, и считается, что их родоначальные магмы зарождаются на глубине 90–150 км [Hammouda, Keshav, 2015]. В аспекте петрогенезиса формирование карбонатсодержащих пород требует предварительного обогащения углеродом и другими летучими веществами субконтинентальной литосферной мантии (СКЛМ). Углерод в источнике плавления не обязательно должен полностью поступать из субдуцированной коры, но субдукция неизбежно способствует этому, поскольку одного лишь первичного мантийного углерода недостаточно для выплавки углеродистых пород [Amsellem et al., 2020]. Изучение консервации летучих компонентов в перидотите показывает, что добавление  $H_2O$  и  $CO_2$  в мантию может происходить в результате глубинного субдукционного цикла [Plank,

Manning, 2019; Sun, Dasgupta, 2019] и данный механизм действует начиная как минимум с ~0.75 млрд лет назад вместе с переходом тектоники плит на «современный стиль» – с тех пор, как начинает доминировать режим «холодной» субдукции [Stern et al., 2016]. Это не означает, что карбонатиты генетически напрямую связаны с зонами субдукции, но свидетельствует о том, что эпохи карбонатитового и кимберлитового магматизма имеют временную корреляцию с притоком углерода и других летучих компонентов в СКЛМ, который вызван повышением скорости движения плит и увеличением объема субдуцирующей литосферы в мантию [Liu et al., 2023]. Это также подтверждается пространственным расположением карбонатитов относительно различных геодинамических обстановок – начиная с девона 75 % карбонатитовых массивов находится не далее 600 км от краевых частей кратонов [Humphreys-Williams, Zahirovic, 2021]. Таким образом, субдукция играет решающую роль в интерпретации проявления карбонатитов и кимберлитов. Сама по себе инициация частичного плавления карбонатизированного перидотита, скорее всего, связана с ранними фазами рифтогенеза [Moore et al., 2008; Tappe et al., 2017]. Например, показано, что Южная Африка испытывает эпизодический щелочной и карбонатитовый вулканизм после распада Гондваны, а основные пики вулканизма связаны с реорганизацией плит в периоды начала раскрытия Индийского океана и Атлантики, а также при последующем изменении кинематики движения плит [Moore et al., 2008]. Периоды, отражающие реорганизацию плит, характеризуются серией крупных несогласий в осадочных бассейнах, тогда как вулканизм отстает от этих событий на ~5–13 млн лет. Наблюдаемая взаимосвязь дает убедительное подтверждение иницированию щелочного внутриплитного вулканизма в Африке под действием тектонических триггеров [Moore, 1976; Bailey, 1993]. Также показано, что во время тектонической нестабильности напряжения будут сосредоточены вдоль зон ослабленной литосферы, например рифтов или древних сутур.

Возникновение щелочно-карбонатитового Томторского массива и опережающих его маломощных даек в пределах Уджинского палеорифта означает, что в данной части литосферы Сибирского кратона существуют глубинные разломы, которые являются каналами для карбонатитового расплава. Наличие глубинных разломов является необходимым критерием для проявления щелочного магматизма. Например, ультраосновные лампрофировые дайки в орогенах контролируются глубинными разломами сдвиговой кинематики, которые возникают при смене поля напряжения от сжатия к транстенсии на завершающей стадии орогенеза [Goldfarb et al., 1988; Groves et al., 2018]. Схожие обстановки описаны в Фенноскандии (Балтийский щит), когда в палеопротерозое на завершающих стадиях свекофеннской орогении в результате посторогенного



**Рис. 7.** Палеотектонические реконструкции положения Сибири на время активизации Томторского массива. (а) – 710 млн лет; (б) – 400 млн лет с предполагаемыми функционирующими зонами субдукции и положением современных и палеорифтов (по [Cao et al., 2024], с изменениями). LAU – Лаврентия, BAL – Baltica, SIB – Сибирь. Рифты: 1 – Уджинский палеорифт, 2 – Вилуйская рифтовая система.

**Fig. 7.** Paleotectonic reconstructions showing the position of Siberia during the activation of the Tomtor massif. (a) – 710 Ma; (b) – 400 Ma, with inferred active subduction zones and locations of modern rifts and paleorifts (modified after [Cao et al., 2024]). LAU – Laurentia, BAL – Baltica, SIB – Siberia. Rifts: 1 – Udzha paleorift; 2 – Viluy rift system.

транспрессионного тектонического режима происходит внедрение щелочных и карбонатитовых комплексов [Nironen, 1997]. Уджинское поднятие в соответствии с многочисленными реконструкциями [Donskaya, 2020, и ссылки в этой работе] находится в зоне сочленения архейского Далдынского террейна и Хапчанского палеопротерозойского орогенного пояса. Соответственно, возможное наличие глубинных разломов согласуется с орогенной структурой фундамента и благоприятствует внутриплитному щелочному магматизму.

Тектоническим триггером для первого этапа внедрения может служить глобальная перестройка плит во время распада Родинии. Небольшая пауза между отделением Сибири от Лаврентии и проявлением щелочного магматизма на Сибирской платформе является характерной для подобных тектонических событий и подробно описана в Южной Африке в постгондванское время: пауза между тектоническими событиями и щелочным вулканизмом составляет 5–15 млн лет [Moore et al., 2008]. Наличие в источнике плавления углерода и других летучих компонентов в среднем неопротерозое в северной части Сибирского кратона, возможно, связано с начавшимися в раннем неопротерозое на Центральном Таймыре конвергентными процессами [Vernikovskiy et al., 2004; Priyatkina et al., 2017] (рис. 6). Возобновление томторского щелочного вулканизма в девоне было инициировано рифтовыми процессами на Сибирской платформе и, в частности раскрытием Вилуйского рифта (рис. 7). Ключевыми моментами в активизации Томтора являются ослабленная литосфера, наличие предшествующей субдукции под Сибир-

ский кратон и тектонические напряжения, связанные с реорганизацией плит в неопротерозое и девоне.

### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По маломощным ультраосновным лампрофировым дайкам в пределах Уджинского поднятия зафиксировано два возраста – 706±9 и 395±20 млн лет. Первый возраст получен <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar методом по флогопиту и отражает время внедрения даек. Внедрение этих даек связано с внедрением щелочного массива Томтор и свидетельствует об ослабленной структуре литосферы и наличии глубинных разломов на Уджинском поднятии. Геодинамическая причина щелочного магматизма связана с субдукцией под Сибирский кратон и реорганизацией тектонических напряжений в момент внедрения самого массива Томтор и его сателлитов. Второй возраст определен U-Pb методом по порфиловым зернам кальцита и, очевидно, маркирует замещение кальцитом первичных оливина и клинопироксена под действием гидротермальных растворов, что совпадает со второй фазой интрузивного магматизма и таким образом маркирует завершающий позднемагматический этап становления массива Томтор.

### 7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Amsellem E., Moynier F., Bertrand H., Bouyon A., Mata J., Tappe S., Day J.M.D., 2020. Calcium Isotopic Evidence for the Mantle Sources of Carbonatites. *Science Advances* 6 (23), eaba3269. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba3269>.

Bailey D.K., 1993. Petrogenetic Implications of the Timing of Alkaline, Carbonatite, and Kimberlite Igneous Activity in Africa. *South African Journal of Geology* 96 (3), 67–74.

Bell K., 2001. Carbonatites: Relationships to Mantle-Plume Activity. In: R.E. Ernst, K.L. Buchan (Eds), *Mantle Plumes: Their Identification Through Time*. Vol. 352. Geological Society of America Special Paper, p. 267–290. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2352-3.267>.

Cao X., Collins A.S., Pisarevsky S., Flament N., Li S., Hasterok D., Müller R.D., 2024. Earth's Tectonic and Plate Boundary Evolution over 1.8 Billion Years. *Geoscience Frontiers* 15 (6), 101922. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101922>.

Donskaya T.V., 2020. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic Granitoids. *Precambrian Research* 348, 105869. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105869>.

Doroshkevich A., Prokopyev I., Kruk M., Sharygin V., Izbrodin I., Starikova A., Ponomarchuk A., Izokh A., Nugumanova Y., 2022. Age and Petrogenesis of Ultramafic Lamprophyres of the Arbarastakh Alkaline-Carbonatite Complex, Aldan-Stanovoy Shield, South of Siberian Craton (Russia): Evidence for Ultramafic Lamprophyre-Carbonatite Link. *Journal of Petrology* 63 (9), egac073. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac073>.

Doroshkevich A.G., Savatenkov V.M., Izbrodin I.A., Prokopyev I.R., Kruk M.N., Izokh A.E., Nosova A.A., 2024. Petrology and Source Characteristics of the Arbarastakh Alkaline Ultramafic Carbonatite-Phoscorite Complex, the Aldan-Stanovoy Shield. *Lithos* 464–465, 107458. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107458>.

Entin A.R., Zaitsev A.I., Nenashev N.I., Vasilenko V.B., Orlov A.N., Tyan O.A., Ol'khovik Yu.A., Ol'shtynskii S.P., Tolstov A.V., 1990. Sequence of Geological Events Related to the Intrusion of the Tomtor Massif of Ultrabasic Alkaline Rocks and Carbonatites (Northwestern Yakutia). *Russian Geology and Geophysics* 31 (12), 42–51 (in Russian) [Энтин А.Р., Зайцев А.И., Ненашев Н.И., Василенко В.Б., Орлов А.Н., Тянь О.А., Ольховик Ю.А., Ольштинский С.П., Толстов А.В. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия) // Геология и геофизика. 1990. Т. 31. № 12. С. 42–51].

Epshtein E.M., Danilchenko N.A., Postnikov S.A., 1994. *Geology of the Unique Tomtor Rare Metal Deposit (North*

*of the Siberian Platform)*. *Geology of Ore Deposits* 36 (2), 83–110 (in Russian) [Эпштейн Е.М., Данильченко Н.А., Постников С.А. Геология Томторского уникального месторождения редких металлов (север Сибирской платформы) // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36. № 2. С. 83–110].

Ernst R.E., Gladkochub D.P., Söderlund U., Donskaya T.V., Pisarevsky S.A., Mazukabzov A.M., El Bilali H., 2023. Identification of the ca. 720 Ma Irkutsk LIP and Its Plume Centre in Southern Siberia: The Initiation of Laurentia-Siberia Separation. *Precambrian Research* 394, 107111. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2023.107111>.

Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S. et al., 2016. Long-Lived Connection Between Southern Siberia and Northern Laurentia in the Proterozoic. *Nature Geoscience* 9, 464–469. <https://doi.org/10.1038/ngeo2700>.

Geological Map of the USSR, 1965. Anabar Series. Sheet R-50-IX,X. Nedra, Moscow (in Russian) [Геологическая карта СССР. Серия Анабарская. Масштаб 1:200000. Лист R-50-IX,X. М.: Недра, 1965].

Goldfarb R.J., Leach D.L., Pickthorn W.J., Paterson C.J., 1988. Origin of Lode-Gold Deposits of the Juneau Gold Belt, Southeastern Alaska. *Geology* 16 (5), 440–443. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016%3C0440:OOLGD0%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016%3C0440:OOLGD0%3E2.3.CO;2).

Groves D.I., Santosh M., Goldfarb R.J., Zhang L., 2018. Structural Geometry of Orogenic Gold Deposits: Implications for Exploration of World-Class and Giant Deposits. *Geoscience Frontiers* 9 (4), 1163–1177. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.01.006>.

Hammouda T., Keshav S., 2015. Melting in the Mantle in the Presence of Carbon: Review of Experiments and Discussion on the Origin of Carbonatites. *Chemical Geology* 418, 171–188. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.05.018>.

Humphreys-Williams E.R., Zahirovic S., 2021. Carbonatites and Global Tectonics. *Elements* 17 (5), 339–344. <https://doi.org/10.2138/gselements.17.5.339>.

Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopyev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshev S., Molchanov A. et al., 2015. Proterozoic Supercontinental Restorations: Constraints from Provenance Studies of Mesoproterozoic to Cambrian Clastic Rocks, Eastern Siberian Craton. *Precambrian Research* 259, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.003>.

Kiselev A.I., Ernst R.E., Yarmolyuk V.V., Egorov K.N., 2012. Radiating Rifts and Dyke Swarms of the Middle Paleozoic Yakutsk Plume of Eastern Siberian Craton. *Journal of Asian Earth Sciences* 45, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.09.004>.

Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A., 2022. Kimberlites of the Yakut Kimberlite Province: Composition and Genesis. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 468 p. (in Russian) [Костровицкий С.И., Яковлев Д.А. Кимберлиты Якутской кимберлитовой провинции (состав и генезис). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. 468 с.]. <https://doi.org/10.53954/9785604788837>.

Le Maitre R.W. (Ed.), 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, Cambridge, 251 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>.

Liu S.-L., Ma L., Zou X., Fang L., Qin B., Melnik A.E., Kirscher U., Yang K.-F., Fan H.-R., Mitchell R.N., 2023. Trends and Rhythms in Carbonatites and Kimberlites Reflect Thermo-Tectonic Evolution of Earth. *Geology* 51 (1), 101–105. <https://doi.org/10.1130/G50775.1>.

Malyshev S.V., Pasenko A.M., Ivanov A.V., Gladkochub D.P., Savatenkov V.M., Meffre S., Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Shcherbakov V.D., 2018. Geodynamic Significance of the Mesoproterozoic Magmatism of the Udzha Paleo-Rift (Northern Siberian Craton) Based on U-Pb Geochronology and Paleomagnetic Data. *Minerals* 8 (12), 555. <https://doi.org/10.3390/min8120555>.

Malyshev S.V., Pasenko A.M., Khudoley A.K., Ivanov A.V., Priyatkina N.S., Pazukhina A.A., Marfin A.E., DuFrane S.A., Sharygin I.S., Gladkochub E.A., 2022. What Is the Age of the Udzha Paleorift?: U-Pb Age of Detrital Zircons from Udzha Basin Terrigenous Succession, Northern Siberia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* 67 (4), 548–567 (in Russian) [Малышев С.В., Пасенко А.М., Худoley А.К., Иванов А.В., Прияткина Н.С., Пазухина А.А., Марфин А.Е., Дюфрейн Э.С., Шарыгин И.С., Гладkochub Е.А. Каков возраст Уджинского палеорифта?: U-Pb возраст обломочных цирконов терригенных пород Уджинского бассейна, север Сибири // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 4. С. 548–567]. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.401>.

Merdith A.S., Collins A.S., Williams S.E., Pisarevsky S., Foden J.D., Archibald D.B., Blanes M.L., Alessio B.L. et al., 2017. A Full-Plate Global Reconstruction of the Neoproterozoic. *Gondwana Research* 50, 84–134. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.04.001>.

Moore A., Blenkinsop T., Coterill F., 2008. Controls on Post-Gondwana Alkaline Volcanism in Southern Africa. *Earth and Planetary Science Letters* 268 (1–2), 151–164. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.01.007>.

Moore A.E., 1976. Controls of Post-Gondwanaland Alkaline Volcanism in Southern Africa. *Earth and Planetary Science Letters* 31 (2), 291–296. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(76\)90222-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(76)90222-3).

Nironen M., 1997. The Svekofennian Orogen: A Tectonic Model. *Precambrian Research* 86 (1–2), 21–44. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(97\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(97)00039-9).

Nosova A.A., Kopylova M.G., Sazonova L.V., Vozniak A.A., Kargin A.V., Lebedeva N.M., Volkova G.D., Peresetskaya E.V., 2021. Petrology of Lamprophyre Dykes in the Kola Alkaline Carbonatite Province (N Europe). *Lithos* 398–399, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106277>.

Okhlopov V.I., Koval S.G., Burtsev I.N., Nepapyshev V.A., Koptil V.I., 1987. Report on the 1:50000 Scale Geological-Geophysical Survey of the Territory of R-50-27-Б; 28-А,Б,Г; 29; 30; 31; 40-В,Г; 41-Б,В,Г; 42; 43 Map Sheets from the Work Done by the Anabar Party on the Upper Udzha Object in 1980–1987. Nyurba (in Russian) [Охлопков В.И., Коваль С.Г., Бурцев И.Н., Непапышев В.А., Коптиль В.И.

Отчет о ГГС масштаба 1:50000 на территории листов R-50-27-Б; 28-А,Б,Г; 29; 30; 31; 40-В,Г; 41-Б,В,Г; 42; 43 по работам Верхне-Уджинского объекта Анабарской партии в 1980–1987 гг. Нюрба, 1987].

Okrugin A.V., Tolstov A.V., 2017. Petrogeochemical Characteristics of the Syenite-Alkali-Ultrabasic Silicate Rock Complex of the Tomtor Massif (Northeastern Siberian Platform). *National Geology* 5, 56–66 (in Russian) [Округин А.В., Толстов А.В. Петрогеохимическая характеристика сиенит-щелочно-ультраосновного силикатного комплекса пород Томторского массива (северо-восток Сибирской платформы) // Отечественная геология. 2017. Т. 5. С. 56–66].

Okrugin A.V., Tolstov A.V., Sleptsov A.P., Baranov L.N., 2019. Petrochemical Features of the Association of Ultrabasic Alkali Rocks and Carbonatites of the Tomtor Massif and Interpretation of Possible Trends of Their Evolution. *Arctic and Subarctic Natural Resources* 24 (4), 7–24 (in Russian) [Округин А.В., Толстов А.В., Слепцов А.П., Баранов Л.Н. Петрохимические особенности ассоциации ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов Томторского массива и интерпретация возможных трендов их эволюции // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24. № 4. С. 7–24]. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-1>.

Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J., Hergt J., 2011. Iolite: Freeware for the Visualisation and Processing of Mass Spectrometric Data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26 (12), 2508. <https://doi.org/10.1039/c1ja10172b>.

Paton C., Woodhead J.D., Hellstrom J.C., Hergt J.M., Greig A., Maas R., 2010. Improved Laser Ablation U-Pb Zircon Geochronology Through Robust Downhole Fractionation Correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11 (3), 2009GC002618. <https://doi.org/10.1029/2009GC002618>.

Plank T., Manning C.E., 2019. Subducting Carbon. *Nature* 574, 343–352. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1643-z>.

Porshnev G.I., Stepanov L.L., 1981. Geology and Mineralogy of the Udzha province (Northwest of the Yakut ASSR). *Soviet Geology* 12, 103–106 (in Russian) [Поршнеv Г.И., Степанов Л.Л. Геология и минералогия Уджинской провинции (северо-запад Якутской АССР) // Советская геология. 1981. Т. 12. С. 103–106].

Priyatkina N., Collins W.J., Khudoley A., Zastrozhnov D., Ershova V., Chamberlain K., Shatsillo A., Proskurnin V., 2017. The Proterozoic Evolution of Northern Siberian Craton Margin: A Comparison of U-Pb-Hf Signatures from Sedimentary Units of the Taimyr Orogenic Belt and the Siberian Platform. *International Geology Review* 59 (13), 1289341. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1289341>.

Prokopiev A.V., Parfenov L.M., Tomshin M.D., Kolodeznikov I.I., 2001. Sedimentary Cover of the Siberian Platform and Adjacent Fold and Thrust Belts. In: L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin (Eds), *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. МАИК Наука/Interperiodica, Moscow, p. 113–155 (in Russian) [Прокопьев А.В., Парфенов Л.М., Томшин М.Д., Колодезников И.И. Чехол

Сибирской платформы и смежных складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 113–155].

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Varchenko M.D., Semenova D.V., Izbrodin I.A., Kruk M.N., 2024. Mineralogy and Zircon Age of Carbonatites of the Srednyaya Zima Complex (Eastern Sayan). *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (2), 0749 (in Russian) [Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Варченко М.Д., Семенова Д.В., Избородин И.А., Крук М.Н. Минералогия и возраст карбонатитов массива Средняя Зима (Восточный Саян) // Геодинамика и тектонофизика. Т. 15. № 2. 0749]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-2-0749>.

Savelyeva V.B., Danilova Yu.V., Bazarova E.P., Danilov B.S., Khromova E.A., 2024. Mica Composition Reflecting Conditions of Aillikite Formation in Zima Complex of Eastern Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (5), 0786 (in Russian) [Савельева В.Б., Данилова Ю.В., Базарова Е.П., Данилов Б.С., Хромова Е.А. Состав слюды как отражение условий образования айликитов Зиминского комплекса (Восточная Сибирь) // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 5. 0786]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-5-0786>.

Shpunt B.R., Shamshina E.A., Brakhfogel F.F., Filippov N.D., 1991. Composition and Petrochemical Features of the Alkaline-Ultrabasic Rocks from the Udzhia Uplift (North of the Siberian Platform). *Bulletin of the Academy of Sciences. Geology Series* 8, 68–80 (in Russian) [Шпунт Б.Р., Шамшина Э.А., Брахфогель Ф.Ф., Филиппов Н.Д. Состав и петрохимические особенности щелочно-ультраосновных пород Уджинского поднятия (север Сибирской платформы) // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1991. Т. 8. С. 68–80].

Shpunt B.R., Shamshina E.A., Shapovalova I.G., Krylov I.N., Davydov Yu.V., Kelle E.Ya., Zabuga B.R., Lazebnik K.A., 1976. Precambrian of the Anabar-Olenek Interfluvium. *Nauka, Novosibirsk*, 140 p. (in Russian) [Шпунт Б.Р., Шамшина Э.А., Шаповалова И.Г., Крылов И.Н., Давыдов Ю.В., Келле Э.Я., Забуга Б.Р., Лазебник К.А. Докембрий Анабаро-Оленекского междуречья. Новосибирск: Наука, 1976. 140 с.].

Skublov S.G., Tolstov A.V., Baranov L.N., Melnik A.E., Levashova E.V., 2020. First Data on the Geochemistry and U-Pb Age of Zircons from the Kamaphorites of the Tomtor Alkaline-Ultrabasic Massif, Arctic Yakutia. *Geochemistry* 80 (3), 125505. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.001>.

Stern R.A., Amelin Yu., 2003. Assessment of Errors in SIMS Zircon U-Pb Geochronology Using a Natural Zircon Standard and NIST SRM 610 Glass. *Chemical Geology* 197 (1–4), 111–142.

Stern R.J., Leybourne M.I., Tsujimori T., 2016. Kimberlites and the Start of Plate Tectonics. *Geology* 44 (10), 799–802. <https://doi.org/10.1130/G38024.1>.

Sun Ch., Dasgupta R., 2019. Slab-Mantle Interaction, Carbon Transport, and Kimberlite Generation in the Deep Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 506, 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.028>.

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B., 2005. Ultramafic Lamprophyres Into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications. *Journal of Petrology* 46 (9), 1893–1900. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi039>.

Tappe S., Romer R.L., Stracke A., Steenfelt A., Smart K.A., Muehlenbachs K., Torsvik T.H., 2017. Sources and Mobility of Carbonate Melts Beneath Cratons, with Implications for Deep Carbon Cycling, Metasomatism and Rift Initiation. *Earth and Planetary Science Letters* 466, 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.03.011>.

Tolstov A.V., 1994. Mineralogy and Geochemistry of Apatite-Magnetite Ores of the Tomtor Massif (Northwestern Yakutia). *Russian Geology and Geophysics* 35 (9), 76–84]. <https://doi.org/10.2113/RGG.1994.35.9.76>.

Vermeesch P., 2018. IsoplotR: A Free and Open Toolbox for Geochronology. *Geoscience Frontiers* 9 (5), 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>.

Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Pease V.L., Gee D., 2004. Neoproterozoic Orogeny Along the Margins of Siberia. *Geological Society of London Memoirs* 30, 233–248. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.18>.

Vladykin N.V., Kotov A.B., Borisenko A.S., Yarmolyuk V.V., Pokhilenko N.P., Sal'nikova E.B., Travin A.V., Yakovleva S.Z., 2014. Age Boundaries of Formation of the Tomtor Alkaline-Ultramafic Pluton: U-Pb and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Geochronological Studies. *Doklady Earth Sciences* 454 (1), 7–11. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14010140>.

Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Salnikova E.B., Nikiforov A.V., Kotov A.B., Vladykin N.V., 2005. 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* 404 (7), 1031–1036.

Zaitsev A.I., Entin A.R., Nenashev N.I., Lazebnik K.A., Tyan O.A., 1992. Geochronology and Isotope Geochemistry of Carbonatites from Yakutia. *Yakutian Scientific Center SB RAS, Yakutsk*, 248 p. (in Russian) [Зайцев А.И., Энтин А.Р., Ненашев Н.И., Лазебник К.А., Тянь О.А. Геохронология и изотопная геохимия карбонатитов Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. 248 с.].

Zhang F., Lenton T.M., del Rey Á., Romaniello S.J., Chen X., Planavsky N.J., Clarkson M.O., Dahl T.W., 2020. Uranium Isotopes in Marine Carbonates as a Global Ocean Paleoredox Proxy: A Critical Review. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 287, 27–49. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.05.011>.

Zhang L.-L., Zhu D.-C., Xie J.-C., Wang Q., Kamo S., Rochín-Bañaga H., Xiao Y., 2023. TARIM Calcite: A Potential Reference Material for Laser ICPMS in Situ Calcite U-Pb Dating. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 38 (11), 2302–2312. <https://doi.org/10.1039/D3JA00222E>.