

УДК 550.4:552.111 (551.248.1)

ПЕРВАЯ НАХОДКА АРХЕЙСКИХ ДАЕК ДОЛЕРИТОВ НА ЗАПАДЕ АЛДАНСКОГО ЩИТА, СИБИРСКИЙ КРАТОН¹

© 2024 г. К. Г. Ерофеева^{а, *}, Ю. О. Ларионова^а, А. В. Самсонов^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

*e-mail: xenin.erofeeva@ya.ru

Поступила в редакцию 29.10.2023 г.

После доработки 11.11.2023 г.

Принята к публикации 26.11.2023 г.

В западной части Алданского щита, в среднем течении р. Токко изучены дайки долеритов, формирующие рой субмеридионального простирания шириной около 1 км. В наиболее мощной дайке долериты хорошо сохранили первичные текстурно-структурные особенности и минеральный состав: плагиоклаз + пижонит + авгит + титаномагнетит. Долериты из зоны закалки и внутренних частей дайки однородны по составу, отвечают низко-Mg толеитам, имеют низкое содержание Ti и других HFSE, со слабо обогащенными спектрами легких РЗЭ и небольшими отрицательными аномалиями Nb. Sm-Nd изотопные исследования магматических минералов долерита из центральной части дайки в изохронных координатах определили хорошую линейную корреляцию, отвечающую возрасту 2510 ± 64 млн лет, который фиксирует время кристаллизации базальтового расплава. В маломощной дайке метадолериты сохранили плагиоклаз-порфиновые структуры, но пироксены в них полностью замещены амфиболом и хлоритом. Метадолериты контрастно отличаются низкими содержаниями MgO, Cr и Ni и более высокими TiO₂, Fe₂O₃, P₂O₅, Nb и всех РЗЭ. Различия составов даек могли быть связаны с длительной (~65%) кристаллизационной дифференциацией исходного расплава и поступлением остаточных расплавов из неглубокой промежуточной магматической камеры по открывающимся трещинам. Такие условия, вероятно, могли быть обеспечены в тектонически стабильной внутриплитной обстановке. По возрасту долериты дайкового роа сопоставимы с широко распространенными в западной части Алданской гранулитогнейсовой области анорогенными гранитами нелюкинского комплекса (~2.4–2.5 млрд лет). Таким образом, полученные данные дополняют характеристику внутриплитного анорогенного магматизма, который имел место в западной части Алданского щита в конце архея и маркировал итоговую консолидацию крупного блока архейской коры Чаро-Олекминской гранит-зеленокаменной области.

Ключевые слова: дайковый рой, архейские долериты, Чаро-Олекминская ГЗО

DOI: 10.31857/S0869590324020058 **EDN:** DCIFZH

ВВЕДЕНИЕ

Рои базитовых даек являются одним из важных источников информации о процессах, происходящих в мантии под континентальной литосферой, а также геологическим инструментом для палеотектонических реконструкций и палеоконтинентальных корреляций (например, Evans, Mitchell, 2011; Ernst et al., 2021, 2023; Johansson et al., 2022; Srivastava et al., 2022). Эти объекты особенно актуальны при решении проблем в раннедокембрийской геологии, в ситуации, когда магматические комплексы существенно эродированы, а дайки

представляют сохранные фрагменты магматической системы. Наиболее детальные исследования проведены на Канадском и Фенноскандинавском щитах, где установлены разновозрастные рои базитовых даек, включая палеопротерозойские и архейские, которые широко используются для расшифровки истории рифтогенеза и раскола архейских кратонов (Hölttä et al., 2014; Pehrsson et al., 2016; Davey et al., 2020; Ernst et al., 2021). На Сибирском кратоне в разных его частях до настоящего времени самые древние известные базитовые дайки имеют возраст 1.86 млрд лет, они распространены по всему югу кратона и широко используются для реконструкций и корреляций в рамках суперкратона Колумбия/Нуна (Pisarevsky et al., 2008; Ларин и др., 2012; Donskaya, 2020; Donskaya, Gladkochub, 2021).

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi: 10.31857/S0869590324020099 для авторизованных пользователей

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В западной части Алданского щита преобладают мезоархейские тоналит-трондьемит-гранодиоритовые (ТТГ) гнейсы и гранитоиды и супракристалльные породы зеленокаменных поясов, которые образуют Чаро-Олекминскую гранит-зеленокаменную область (ГЗО) (рис. 1а) (Котов, 2003). Эта мезоархейская область служит фундаментом для палеопротерозойских вулканогенно-осадочных толщ удоканского комплекса и рамой для разнообразных по составу интрузивных пород неархейского и палеопротерозойского возраста. Среди последних резко преобладают гранитоиды нескольких возрастных комплексов (каларский – 2.62 млрд лет, чародоканского – 2.57–2.61 млрд лет, нелюкинский – 2.40–2.52 млрд лет, катугинский – 2.07 млрд лет, ничатский и куандинский – 1.91 млрд лет, кодарский и ханинский – 1.86 млрд лет) (Ларин и др., 2012). Базитовые интрузивы и дайки, описанные в рамках чинейского, куранахского и сулуматского комплексов, имеют резко подчиненное распространение и близкий возраст около 1.87 млрд лет (Попов и др., 2009, 2012; Ковач и др., 2023).

Исследования проведены в центральной части Чаро-Олекминской ГЗО (рис. 1), которая максимально удалена от палеопротерозойских орогенов, и поэтому претерпела минимальную тектоническую и метаморфическую переработку в палеопротерозойское время. Это иллюстрируется уникальной сохранностью практически неметаморфизованных палеопротерозойских красноцветных песчаников, заполняющих Угуйский грабен (рис. 1б) (Ковач и др., 2023), стратиграфические аналоги которых в Кодаро-Удоканском и в Олдонгсинском прогибах метаморфизованы в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций (Сочава, 1986).

В геологическом строении района исследований преобладают комплексы мигматизированных существенно плагиоклазовых гнейсов олекминского комплекса, интродуцированные постмигматитовыми гранитоидами и диоритами чародоканского комплекса (рис. 1б). Базитовый магматизм имеет резко подчиненное распространение. Дайки габбро-долеритового состава сулуматского комплекса, формирующие рой широтного простирания и распространенные в южной части Угуйского грабена и его гранито-гнейсовом обрамлении, имеют возраст 1874 млн лет (Ковач и др., 2023) и отвечают палеопротерозойскому базитовому магматизму, известному и в других частях Чаро-Олекминской ГЗО (Попов и др., 2009, 2012; Ларин и др., 2012). Еще один рой долеритовых даек субмеридионального простирания, выделенный при картировании (Государственная ..., 2010), является предметом исследований в настоящей статье.

Изучение петрографических особенностей пород и определение состава минералов проводилось методами оптической микроскопии и на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA LMS с приставкой для энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа Ultim Max 65 с интегрированным программным обеспечением AZtecLive Automated (Oxford Instruments) в Центре коллективного пользования Института физики Земли РАН (Москва). Анализ проводился в полированных шлифах, напыленных углеродом (толщина напыления 20 нм) при ускоряющем напряжении 20 кВ и постоянном токе электронного пучка 15 ± 0.05 нА. Рабочее расстояние – 15 мм, время накопления спектра – 60 с. При обработке спектров рентгеновского излучения проводилась оптимизация по спектрам простых соединений и стандартизация по набору эталонов породообразующих минералов. Ошибки измерений составили для концентраций свыше 10 мас. % – до 2 отн. %; 5–10 мас. % – до 5 отн. %; от 1 до 5 мас. % – до 10 отн. %. Химические составы минералов из долеритов приведены в Supplementary²1, ESM_1.

Содержание петрогенных элементов определялось на рентгенофлуоресцентном спектрометре последовательного действия PW-2400 (Philips Analytical B. V.) в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН, Москва). Анализ проводился в стекловатых дисках, полученных при сплавлении 0.3 г порошка пробы с 3 г тетрабората лития. Потери при прокаливании определялись гравиметрическим методом. Точность анализа составляла 1–5 отн. % для элементов с концентрациями выше 0.5 и до 12 отн. % для элементов с концентрацией ниже 0.5 мас. %. Концентрации редких и редкоземельных элементов определялись методом ICP-MS в лаборатории ядерно-физических и масс-спектральных методов анализа ИПТМ РАН по методике (Карандашев и др., 2007).

Выделение монофракций плагиоклаза и пироксенов проведено в лаборатории Анализа минерального вещества ИГЕМ РАН по стандартной методике с использованием плотностной и магнитной сепараций и последующей ручной доочисткой под бинокляром.

Изотопные Sm-Nd исследования минералов и валового состава долерита выполнены

² В дополнительных материалах к русской и английской онлайн-версиям статьи на сайтах <https://elibrary.ru/> и <http://link.springer.com/> соответственно приведены: Supplementary 1, ESM_1.pdf – Представительные анализы (SEM) составов минералов из долеритов; Supplementary 2, ESM_1–ESM_2.xlsx – Моделирование процессов фракционной кристаллизации.

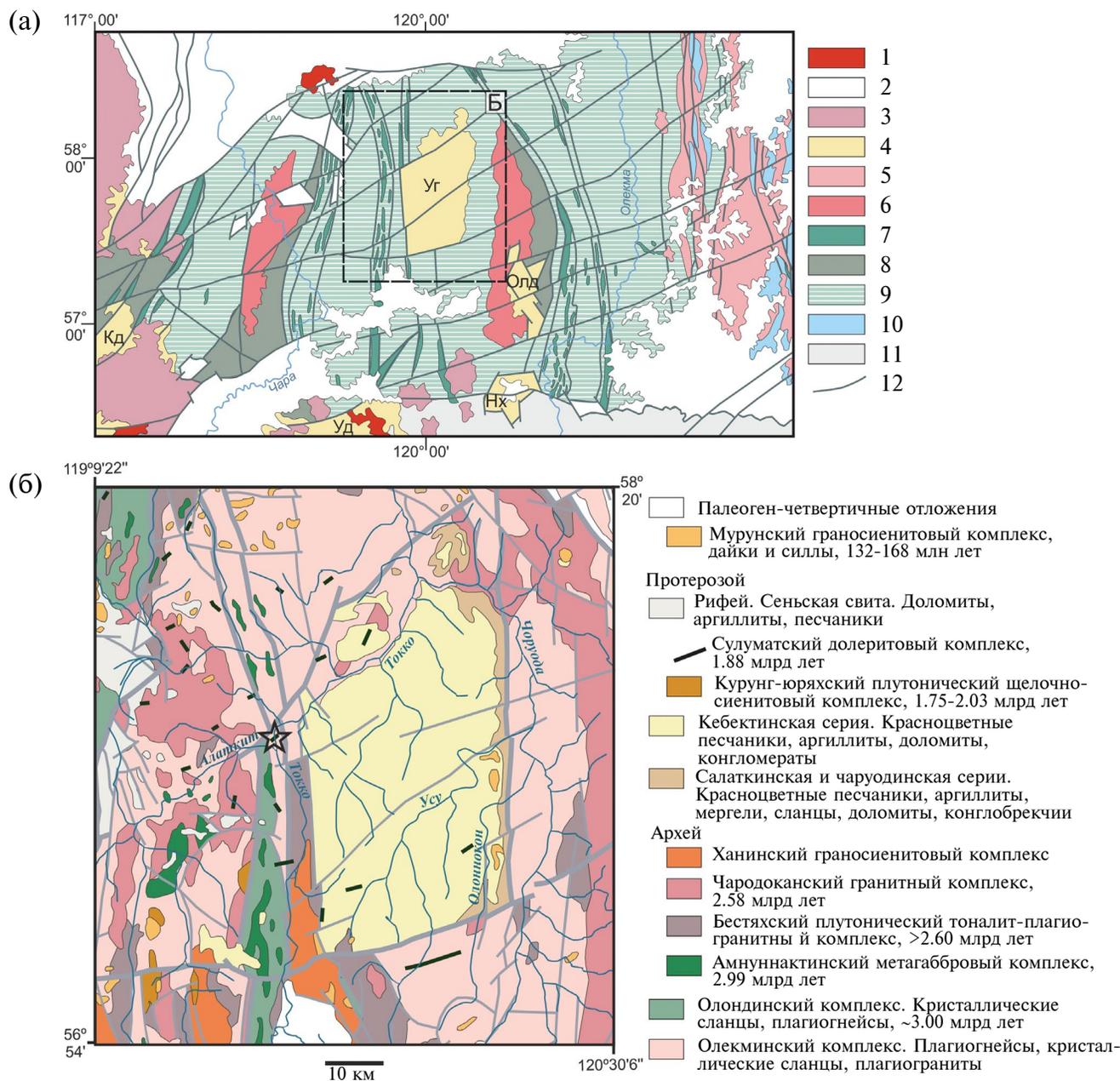


Рис. 1. (а) Схематическая геологическая карта западной части Алданского щита по (Котов, 2003; Ковач и др., 2023). 1 – фанерозойские гранитоиды; 2 – фанерозойские отложения; 3 – палеопротерозойские гранитоиды кодарского, ханинского, ничатского и каменковского комплексов; 4 – палеопротерозойские бассейны и грабен-синклинали с метасадочными породами удоканского комплекса: Уг – Угуйский; Олд – Олдонгсинский; Нх – Нижнеханнинский; Кд – кодарская зона, Уд – удоканская зона Кодаро-Удоканского бассейна; 5 – палеопротерозойские–неоархейские гранитоиды нелюкинского комплекса; 6 – неоархейские гранитоиды чародоканского комплекса; 7 – раннедокембрийские слабо метаморфизованные осадочные и вулканические породы субганского комплекса; 8 – тоналит-трондьемитовые ортогнейсы оломокитского комплекса и глубоко метаморфизованные осадочные и вулканические породы оломокитской и чарской толщ алданского гранулитогнейсового мегакомплекса; 9 – тоналит-трондьемитовые ортогнейсы олекминского комплекса; 10 – тоналит-трондьемитовые ортогнейсы западно-алданского комплекса и глубоко метаморфизованные осадочные и вулканические породы чугинской, амедицинской и курумканской толщ алданского гранулитогнейсового мегакомплекса; 11 – зона сочленения Алданского щита и Джугджуро-Становой складчатой области; 12 – разрывные нарушения. (б) Фрагмент геологической карты Токкинской ветви Токко-Ханинского зеленокаменного пояса по (Государственная ..., 2010). Звездочкой показано место отбора образцов долеритов.

в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН. Химическая подготовка вещества для масс-спектрометрических измерений проведена по методике, описанной в (Ларионова и др., 2007). Измерения изотопных отношений проводились на масс-спектрометре Sector 54 (Micromass, Англия) в мультидинамическом режиме с использованием трехленточного источника ионов (Thirlwall, 1991). Итоговая погрешность определения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ не превышает $\pm 0.005\%$ (2σ ед.) с учетом воспроизводимости результатов по внутрилабораторному стандарту Nd-ИГЕМ $0.512400 \pm \pm 11$ (2σ ед., $N = 24$), что соответствует значению 0.511852 в стандарте изотопного состава неодима LaJolla. Погрешность определения $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ оценивается в $\pm 0.3\%$ (2σ ед.) по результатам измерения стандарта BCR-1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Долеритовые дайки субмеридионального роя были изучены по левому борту ручья Алаткит, примерно в 3 км от места его впадения в р. Токко (рис. 1б) в серии разрозненных береговых замытых обнажений и скальных обнажений над первой террасой. Вмещающими породами для даек служат мигматизированные полосчатые ТТГ олекминского комплекса, граниты и пегматиты, смятые в систему сложных изоклиналильных складок (рис. 2а). Простирающие полосчатости и осей изоклиналильных складок в целом субмеридиональные, но с локальными вариациями в 30° – 40° даже в пределах небольшого обнажения.

Среди гнейсов и гранитоидов на интервале около 1 км установлены три дайки долеритов меридионального (345° – 355°) простираения с субвертикальным залеганием.

Восточная дайка-1 ($N 57^\circ 57.398'$, $E 119^\circ 38.065'$) вскрыта в скальном обрыве (рис. 2б) и в береговом замытом обнажении, ее мощность составляет около 8 м. Дайка имеет участками прямолинейные, а участками извилистые и ступенчатые контакты с вмещающими гнейсами и гранитоидами (рис. 2в). Образование заливчатых границ, возможно, отражает первичную морфологию контактов даек, а ступенчатые границы, вероятно, образовались при наложенных микросдвигах субширотного простираения, которыми расположена вся дайка (рис. 2г). Магматическая текстурная неоднородность дайки проявлена слабо. Узкая (около 1 см) микрозернистая зона закалки сменяется мелкозернистыми долеритами краевой части дайки, которые далее к центру дайки очень незначительно меняют степень зернистости. Более ярко проявлена вторичная вещественная неоднородность дайки, связанная с ее метасоматической переработкой вдоль системы разноориентированных разломов (рис. 2б, 2г), с которыми сопряжена

сульфидная минерализация. В участках сгущения этих трещин долериты приобретают зеленоватый оттенок за счет амфиболитизации и содержат тонкую рассеянную сульфидную вкрапленность. Следует отметить, что этой наложенной сульфидной минерализацией, похоже, охвачена вся дайка, на что указывают белесые и желтоватые охристые потеки на ее скальном выходе (рис. 2б).

Западная дайка-2 ($N 57^\circ 57.597'$, $E 119^\circ 37.336'$) вскрыта в небольшом скальном обнажении и в замытом береговом выходе у прижима – переката ручья. Дайка имеет переменную мощность от 0.5 до <1 м и выраженную плитчатую отдельность, параллельную контактам дайки (рис. 2д). Породы дайки имеют однородную текстуру и представлены микрозернистым амфиболитизированным метадолеритом.

По петрографическим характеристикам изученные дайки представляют пример классических долеритов. В дайке-1 вблизи контакта порода (обр. ДА1-1) с мелко-среднезернистой долеритовой структурой сложена зернами пироксена и плагиоклаза размером до 0.4 мм (рис. 3а, 3б). Субидиоморфные зерна клинопироксена (45 об. %) имеют зональное строение – центральные части зерен представлены пижонитом с магнезиальностью ($Mg\# = Mg/(Mg+Fe)$) 74–76, реже авгитом с $Mg\#$ 68–71, с Al_2O_3 1.21–3.09 мас. % и низкими содержаниями TiO_2 0.18–0.49 мас. % и MnO 0.29–0.37 мас. %. Краевые части представлены авгитом с $Mg\#$ 38–52, который имеет сопоставимое с центральными частями содержание Al_2O_3 (1.69–2.72 мас. %), отличается более высокими концентрациями TiO_2 и MnO (0.72–0.94 и 0.43–0.58 мас. % соответственно). Переход от центральных частей зерен пироксена к краевым диффузионный. В виде включений в пироксене присутствует плагиоклаз с An_{41-50} . Краевые части пироксена замещаются хлоритом. Плагиоклаз (55 об. %) формирует удлиненные таблитчатые зерна зонального строения (центр – An_{39-61} , край – An_{29-37}). В пироксен-плагиоклазовых интерстициях развит калиевый полевой шпат и кварц. Рудные минералы представлены титаномагнетитом (~5 об. %) и сульфидами.

В центральной части тела средне-крупнозернистый долерит (обр. ДА1-2) сложен зернами пироксена и плагиоклаза (рис. 3в–3д). Пироксен формирует субидиоморфные призматические зерна размером до 2 мм с зональным строением. Центральные части зерен представлены авгитом ($Mg\#$ 64–72) и пижонитом ($Mg\#$ 67–73); узкие (<0.2 мм) краевые зоны по составу отвечают авгиту ($Mg\#$ 40–50), реже пижониту ($Mg\#$ 39–43). Вдоль трещин и на границе зерен пироксена развивается хлорит. Плагиоклаз формирует удлиненные таблитчатые зерна. Центральные части плагиоклаза имеют состав An_{62-44} , краевые – An_{39-27} . В пироксен-плагиоклазовых интерстициях развиты



Рис. 2. (а–д) Фотографии геологических обнажений в левом борту руч. Алаткит: (а) – мигматизированные полосчатые ТТГ олекминского комплекса, вмещающие долеритовые дайки; (б–г) – восточная дайка-1 (обр. ДА1): (б) – скальный выход долеритовой дайки-1; (в) – извилистые и ступенчатые контакты долеритовой дайки-1 с вмещающими ТТГ и гранитоидами; (г) – микродвиги в дайке-1; (д) – западная дайка-2 (обр. ДА2), вскрытая в скальном обнажении.

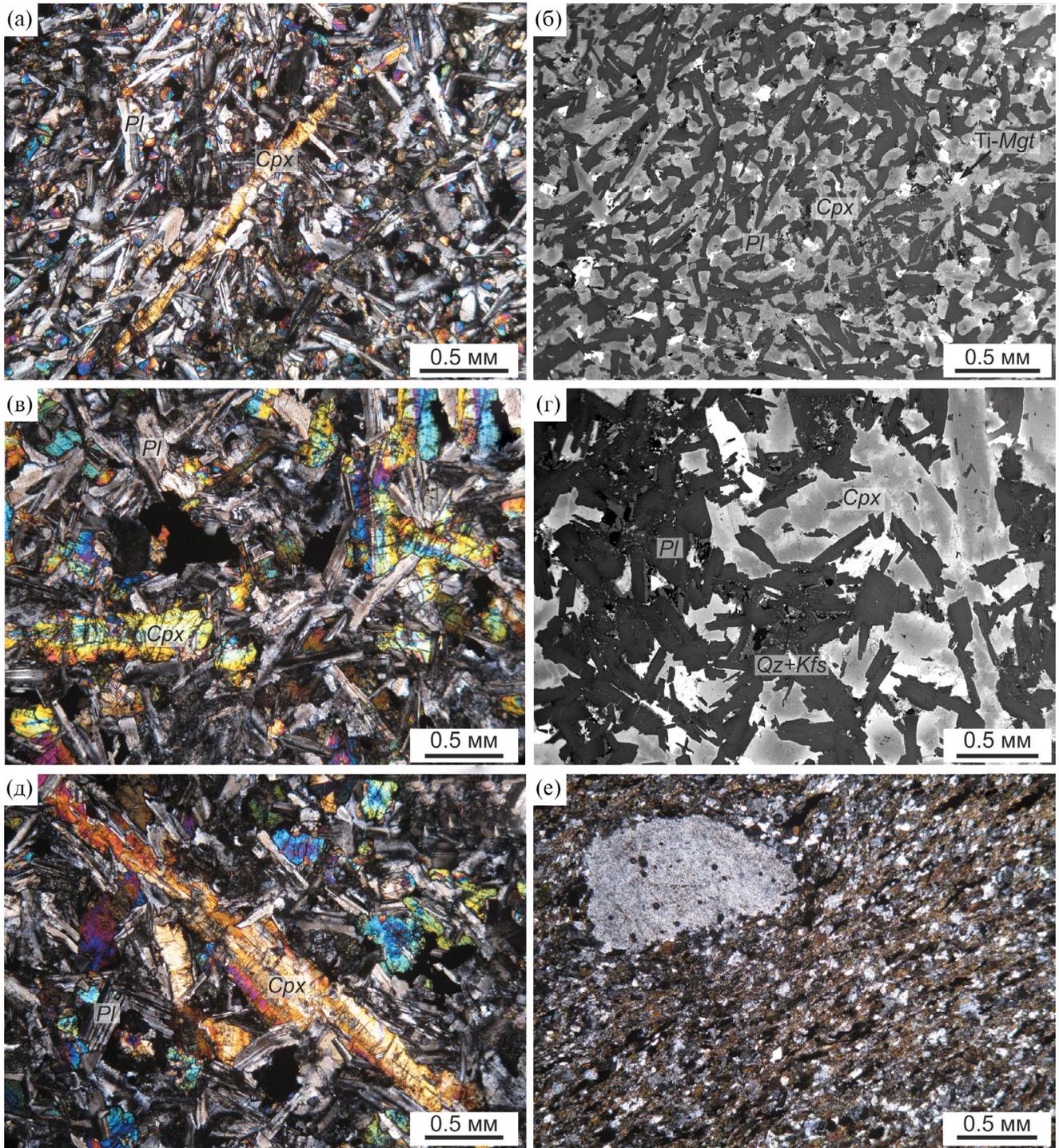


Рис. 3. Микрофотографии долерита из закалочной (а, б – обр. ДА1-1), и центральной (в, г – обр. ДА1-2; д – обр. ДА1-4) частей дайки-1 и (е) метадолерита дайки-2. Изображения (а, в, д, е) – в скрещенных николях; (б, г) – в обратноотраженных электронах.

гранофировые агрегаты. Рудные минералы представлены титаномagnetитом и сульфидами.

Метадолерит (обр. ДА2-1) из маломощной дайки имеет плагиоклаз-порфировую мелкозернистую

гнейсовидную текстуру (рис. 3е) и состоит из амфибола (35–40%), плагиоклаза (35–40%), калиевого полевого шпата (~10%) и кварца (~10%). Плагиоклаз формирует редкие вкрапленники

Таблица 1. Геохимия долеритов из даек Алаткитского роя

Компоненты	Дайка-1					Дайка-2
	ДА1-1	ДА1-2	ДА1-3	ДА1-4	ДА1-5	ДА2-1
	долерит, закалка	долерит, центр дайки	долерит, центр дайки	долерит, центр дайки	долерит, центр дайки	метадолерит
SiO ₂	51.1	51.0	50.9	50.8	50.7	55.4
TiO ₂	1.23	1.24	1.25	1.19	1.24	2.19
Al ₂ O ₃	14.1	14.5	14.0	14.2	14.4	12.8
Fe ₂ O ₃ ^{tot}	14.3	14.1	14.4	14.4	14.3	16.1
MnO	0.201	0.198	0.200	0.203	0.195	0.208
MgO	6.01	5.85	6.01	6.01	5.78	2.03
CaO	9.40	9.27	9.31	9.49	9.39	5.84
Na ₂ O	2.70	2.76	2.85	2.66	2.85	2.54
K ₂ O	0.74	0.79	0.73	0.77	0.83	2.03
P ₂ O ₅	0.22	0.29	0.28	0.25	0.27	0.92
S	0.11	0.08	0.08	0.06	0.09	0.08
П.п.п.	0.36	0.12	0.15	0.78	0.63	1.08
Сумма	99.3	99.5	99.5	98.9	99.0	98.4
Li	11.1	6.21	6.69	9.83	13.1	41.1
Be	0.602	0.654	0.708	0.692	0.796	2.20
Sc	42.8	41.4	40.7	45.4	33.7	25.1
V	333	319	322	286	322	20.1
Cr	55.1	43.4	49.2	60.6	42.3	5.14
Co	60.1	57.7	56.8	57.9	56.2	25.8
Ni	85.5	77.2	76.0	87.1	77.0	< ПО
Cu	64.5	62.7	62.2	64.0	61.9	14.0
Zn	124	115	121	122	117	170
Ga	19.2	19.9	18.2	24.2	18.4	24.0
Rb	16.3	15.6	14.3	20.2	18.0	61.2
Sr	379	367	350	403	363	268
Y	23.0	23.2	22.8	22.7	21.8	64.3
Zr	98.5	103	105	91.0	103	369
Nb	8.21	3.93	8.57	3.73	3.87	27.8
Mo	0.756	0.483	0.486	0.985	0.442	2.68
Sn	0.828	0.543	0.736	0.899	0.471	2.64
Cs	0.572	0.383	0.372	0.469	0.448	1.64
Ba	353	362	355	399	338	1048
La	17.2	14.1	14.7	15.6	13.6	73.7
Ce	40.4	31.3	28.9	35.1	29.0	159
Pr	4.93	3.78	3.59	4.43	3.66	17.8
Nd	21.5	18.0	17.1	20.0	17.5	72.5
Sm	4.72	4.22	4.06	4.44	4.12	14.5
Eu	1.55	1.36	1.27	1.42	1.29	3.52
Gd	4.92	4.10	4.00	4.31	4.02	13.9
Tb	0.745	0.624	0.609	0.703	0.595	1.99
Dy	4.38	3.97	3.78	4.04	3.85	11.6

Таблица 1. Окончание

Компоненты	Дайка-1					Дайка-2
	ДА1-1	ДА1-2	ДА1-3	ДА1-4	ДА1-5	ДА2-1
	долерит, закалка	долерит, центр дайки	долерит, центр дайки	долерит, центр дайки	долерит, центр дайки	метадолерит
Ho	0.916	0.818	0.768	0.844	0.784	2.32
Er	2.62	2.28	2.17	2.43	2.18	6.32
Tm	0.362	0.324	0.314	0.333	0.312	0.864
Yb	2.39	2.01	1.93	2.24	1.92	5.56
Lu	0.357	0.297	0.291	0.342	0.296	0.815
Hf	2.49	2.41	2.25	2.59	2.43	8.75
Ta	0.275	0.369	0.294	0.258	0.323	1.61
W	0.124	0.087	0.088	0.359	0.072	0.860
Ti	0.136	0.095	0.079	0.170	0.107	0.449
Pb	6.24	3.62	3.49	4.88	4.88	16.5
Th	1.25	1.03	0.942	1.17	0.89	12.0
U	0.225	0.181	0.181	0.209	0.184	2.22

Примечание. Содержания породообразующих оксидов приведено в мас. %, микроэлементов – в мкг/г. < ПО – содержание элемента ниже предела обнаружения.

размером до 2 мм и мелкие зерна в основной массе породы. В качестве рудных присутствует титаномагнетит и сульфиды.

По петрохимическим характеристикам пять проб долеритов, отобранных из зоны закалки и центральной части мощной дайки-1, а также из участка со сгущением зонк метасоматической переработки, очень однородны по содержаниям всех элементов (табл. 1, рис. 4). Долериты имеют умеренные содержания MgO, Cr, Ni, TiO₂, Al₂O₃, слабо фракционированные спектры легких и тяжелых РЗЭ без Eu-аномалии и небольшие отрицательные Nb-аномалии (Nb/Nb* = 0.3–0.8) (табл. 1, рис. 4). Долерит из дайки-2 контрастно отличается от долеритов дайки-1 более низкими содержаниями MgO, Al₂O₃, CaO, Cr и Ni и более высокими TiO₂, Fe₂O₃, P₂O₅, K₂O, Zr, Nb, Y (табл. 1, рис. 4) и всех РЗЭ, в спектре которых появляется заметная отрицательная Eu-аномалия (рис. 4).

Sm-Nd изотопные исследования породообразующих минералов (пироксены и плагиоклаз) и валовой пробы долерита позволили установить изохронный возраст 2510 ± 64 млн лет (СКВО = 1.1), который, вероятно, отвечает времени кристаллизации базальтового расплава, и ε_{Nd}T = + 0.1 (табл. 2, рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Обнаружение архейских долеритовых даек, в которых породообразующие магматические

минералы сохранили Sm-Nd изотопно-геохронологические характеристики и позволили провести изотопное датирование, является большой удачей. Эта находка дополняет данные об уникальной сохранности центральной части Чаро-Олекминской ГЗО.

Установленные контрастные различия составов двух разобщенных даек в составе одного роя не могут быть связаны с разной степенью вторичных преобразований, а, скорее, фиксируют различия составов их магматических протолитов. Вариации состава двух даек хорошо объясняются процессом фракционной кристаллизации, если предположить, что исходный расплав по составу отвечал наиболее примитивному долериту из закалочной зоны дайки-1 (обр. ДА1-1), а продукт его кристаллизационной дифференциации – составу метадолерита дайки-2 (обр. ДА2-1).

В долеритах закалочной зоны центральные части пироксена (пижонит, Mg# 74–76) равновесны с валовым составом породы (K_D(Fe-Mg)^{Cpx-liq} = 0.27–0.33). Их кристаллизация происходила в малоглубинных условиях при давлении 0.9–3.6 ± ± 1.4 кбар (Neave, Putirka, 2017). Сопоставимые давления (0.9–3.6 ± 1.4 кбар) были получены для краевых частей пироксена (авгит, Mg# 45–50), равновесных с расплавом, по составу отвечающему метадолериту маломощной дайки (K_D(Fe-Mg)^{Cpx-liq} = 0.24–0.31). Это указывает на возможную кристаллизацию расплава в изобарических условиях. Петрологическое моделирование было проведено

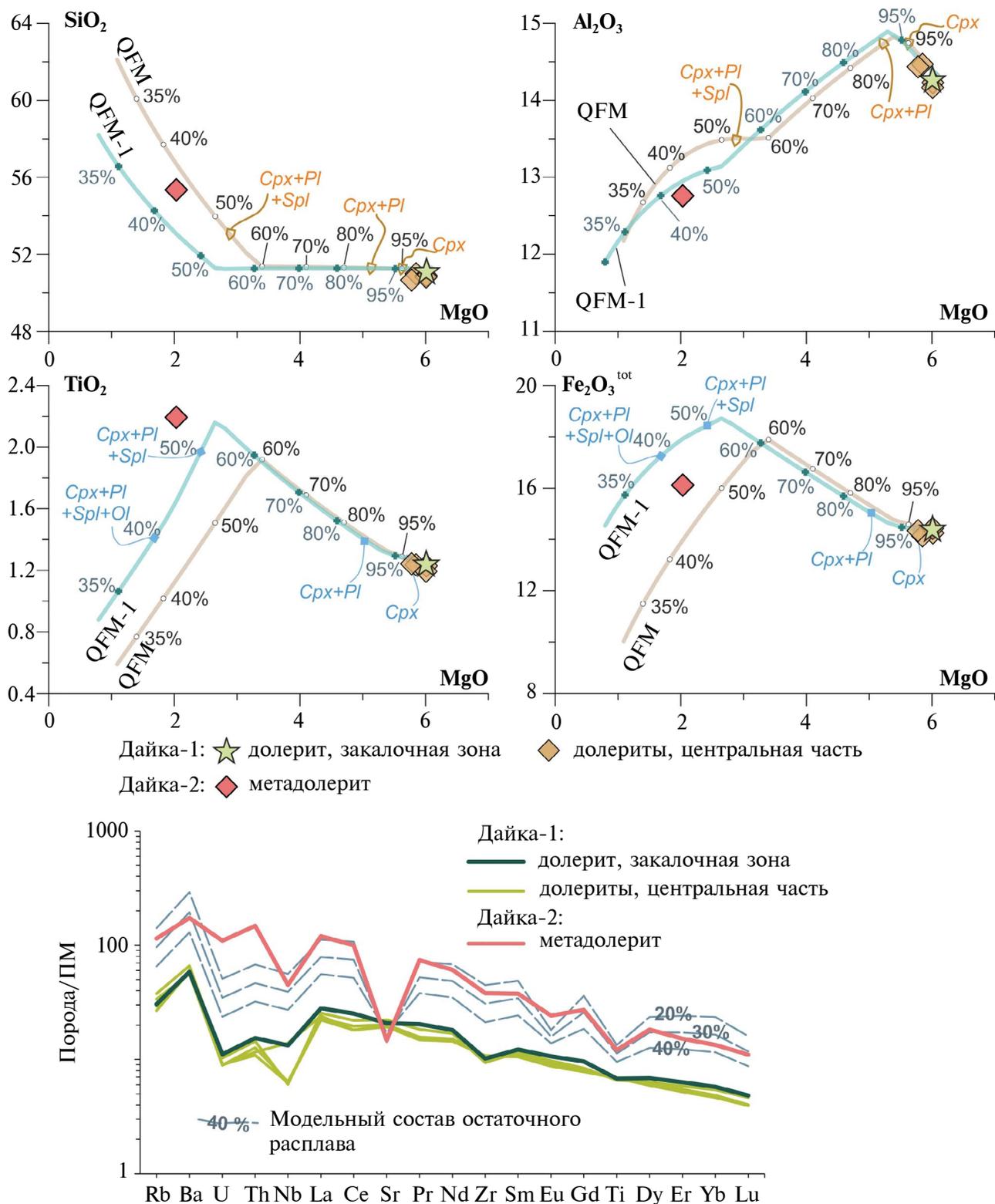


Рис. 4. Моделирование кристаллизационной дифференциации исходного расплава, отвечающего по составу долериту из закалочной зоны дайки-1 (обр. ДА1-1). Заданные параметры моделирования описаны в тексте. На бинарных диаграммах линиями показаны модельные составы остаточных расплавов и их процент, выносками и аббревиатурами показаны фракционирующие минералы. Модельный состав РЗЭ в остаточных расплавах рассчитан с учетом фракционирования ассоциации клинопироксен + плагиоклаз + шпинель (55:43:2). Спектры распределения РЗЭ долеритов нормированы по примитивной мантии (ПМ) по (Wedepohl, Hartmann, 1994).

Таблица 2. Sm–Nd изотопные данные для минералов и долеритов из даек руч. Алаткит

Компоненты	Долерит (обр. ДА1-4)			
	долерит, валовый состав	плаггиоклаз	авгит	пижонит
Sm, мкг/г	4.14	0.735	2.99	1.36
Nd, мкг/г	18.7	3.97	11.0	4.24
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1341	0.1119	0.1649	0.1933
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.511604	0.511211	0.512101	0.512564
$\pm 2\sigma$	0.000008	0.000012	0.000008	0.000008
$\epsilon_{\text{Nd}}\text{T}$	+0.1			

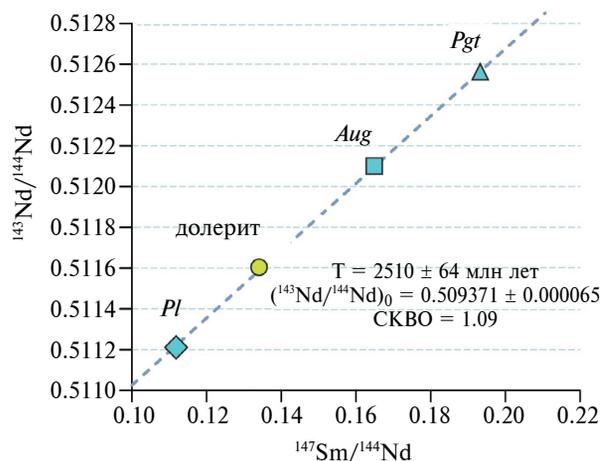


Рис. 5. Sm–Nd изохронная диаграмма для породообразующих минералов и валовой пробы долерита из дайки-1.

с использованием программы easyMelts (разработана Einari Suikkanen, доступна по ссылке <http://magmasource.caltech.edu>) при постоянном давлении 1.5 кбар, кислородном буфере QFM и QFM-1, исходной температуре 1200°C с шагом –5°C (рис. 4; см. Supplementary, ESM_2). Солидусные минеральные ассоциации (пижонит + авгит + плаггиоклаз) хорошо согласуются с наблюдаемыми ассоциациями в долеритах. Остаточные расплавы, полученные при ~65% кристаллизационной дифференциации, соответствуют составу метадолерита дайки-2 (рис. 4). Модельные расчеты, не фиксирующие оливин на ликвидусе этих составов, а также низкие

концентрации в долеритах MgO, Cr и Ni указывают на глубокую дифференциацию исходных расплавов.

Внедрение в полого-открывающиеся трещины базальтового расплава разной степени дифференциации предполагает, что питающая камера пребывала какое-то время в стабильных условиях, что обеспечивало дифференциацию магмы. При возобновлении тектонических подвижек открывающиеся трещины заполнялись остаточным расплавом. Такие условия, вероятно, могли быть обеспечены в тектонически стабильной внутриплитной обстановке.

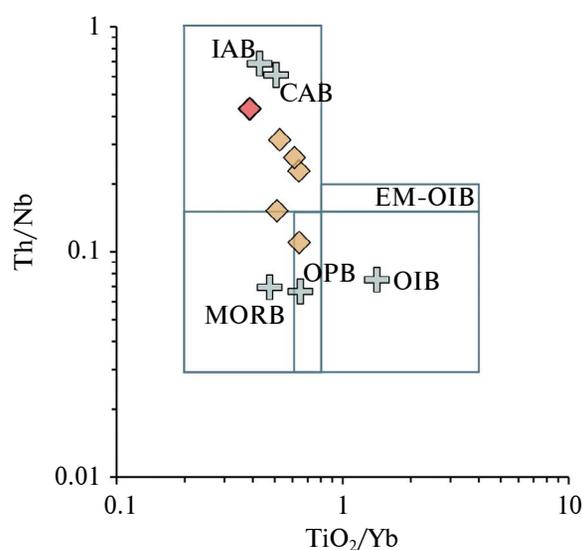
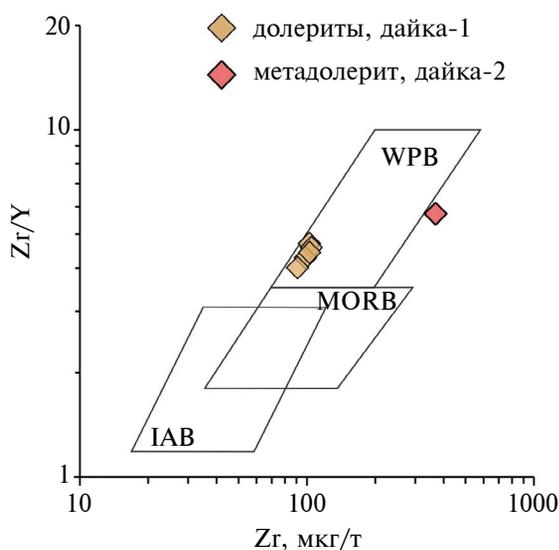


Рис. 6. Тектонические диаграммы (Pearce, Norry, 1979; Pearce et al., 2021) для долеритов из Алаткитского роя. MORB – базальты срединно-океанических хребтов, IAB – базальты островных дуг, WPB – внутриплитные базальты, OIB – базальты океанических островов, CAB – базальты континентальных дуг, OPB – океанические платобазальты.

Вопрос о тектонической позиции изученных долеритовых даек не решается однозначно. С одной стороны, Алаткитский дайковый рой по возрасту сопоставим с распространенными в Западно-Алданской гранулит-гнейсовой области внутриплитными гранитами нелюкинского комплекса, которые имеют ярко выраженные анорогенные характеристики (Сальникова и др., 1997; Ларин и др., 2012), что предполагает внутриплитную природу изученных долеритов. С другой стороны, петротектоническая специфика долеритов указывает на их возможное формирование как во внутриплитных (WPM), так и в островодужных (IAB) обстановках (рис. 6). Однако расположение фигуративных точек составов долеритов в области островодужных обстановок (рис. 6), вероятно, связано с контаминацией расплавов веществом коры (например, Xia, Li, 2019), о чем свидетельствуют низкое содержание Ti, небольшая отрицательная аномалия Nb и близкая к нулю величина ϵ_{Nd}^T в долеритах.

Таким образом, полученные данные дополняют характеристику внутриплитного анорогенного магматизма, который имел место в западной части Алданского щита в самом конце архея и маркировал итоговую консолидацию крупного блока архейской коры Чаро-Олекминской ГЗО.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников компании ООО “Нерюнгри Металлик” за помощь в проведении экспедиционных работ.

Источники финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-01068, <https://rscf.ru/project/23-77-01068/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-50 – Бодайбо. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. 612 с.

Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А. и др. Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. № 73. С. 12–22.

Котов А.Б. Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита. Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 78 с.

Ковач В.П., Бортников В.В., Котов А.Б. и др. Источники песчаников Угуйского грабена и вопросы корреляции осадочных толщ Удоканского комплекса западной части Алданского щита // ДАН. 2023. Т. 512. № 1. С. 12–20. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600868>

Ларин А.М., Котов А.Б., Великославинский С.Д., и др. Раннедокембрийские гранитоиды А-типа Алданского щита и его складчатого обрамления: источники и геодинамические обстановки формирования // Петрология. 2012. Т. 20. № 3. С. 242–265.

Ларионова Ю.О., Самсонов А.В., Шатагин К.Н. Источники архейских санукитоидов Карельского кратона: Nd и Sr изотопно-геохимические данные // Петрология. 2007. Т. 15. № 6. С. 590–612.

Попов Н.В., Котов А.Б., Постников А.А. и др. Возраст и тектоническое положение Чинейского расслоенного массива (Алданский щит) // ДАН. 2009. Т. 424. № 4. С. 517–521.

Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Беляцкий Б.В. и др. U-Pb возраст гранитоидов зоны сочленения Олекминской гранит-зеленокаменной и Алданской гранулит-гнейсовой областей // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1997. Т. 5. № 2. С. 3–12.

Сочава А.В. Петрохимия верхнего архея и протерозоя запада Витимо-Алданского щита. Л.: Наука, 1986. 160 с.

Davey S.C., Bleeker W., Kamo S.L. et al. Archean block rotation in Western Karelia: Resolving dyke swarm patterns in metacraton Karelia-Kola for a refined paleogeographic reconstruction of supercraton Superia // Lithos. 2020. V. 368–369. 105553. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105553>

Donskaya T.V. Assembly of the Siberian Craton: constraints from Paleoproterozoic granitoids // Precam. Res. 2020. V. 348. 105869. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105869>

Donskaya T.V., Gladkochub D.P. Post-collisional magmatism of 1.88–1.84 Ga in the southern Siberian Craton: An overview // Precam. Res. 2021. V. 367. 106447. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106447>

Ernst R.E., Dickson A., Bekker A. Environmental Change and Large Igneous Provinces: The Deadly Kiss of LIPs (Geophysical Monograph Series). 1st Edition. 2021. 528 p.

Ernst R.E., Gladkochub D.P., Söderlund U. et al. Identification of the ca. 720 Ma Irkutsk LIP and its plume centre in southern Siberia: the initiation of Laurentia-Siberia separation // Precam. Res. 2023. V. 394. 107111. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2023.107111>

Evans D.A.D., Mitchell R.N. Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic-Mesoproterozoic supercontinent Nuna // Geology. 2011. V. 39. P. 443–446. <https://doi.org/10.1130/G31654.1>

Hölttä P., Heilimo E., Huhma H. et al. The Archaean Karelia and Belomorian Provinces, Fennoscandian Shield // Eds. Y. Dilek, H. Furnes Evolution of Archaean crust and early life. Modern approaches in solid Earth sciences, Springer, 2014. V. 7. P. 55–102. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7615-9_3

Johansson Å., Bingen B., Huhma H. et al. A geochronological review of magmatism along the external margin of Columbia and in the Grenville-age orogens forming the core of Rodinia // *Precam. Res.* 2022. V. 371. 106463.

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106463>

Neave D.A., Putirka K.D. A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic rift zones // *Amer. Mineral.* 2017. V. 102. P. 777–794.

<https://doi.org/10.2138/am-2017-5968>

Pearce J.A., Norry M.J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979. V. 69. P. 33–47.

Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. LIP printing: use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record // *Lithos.* 2021. V. 392–393. P. 106068.

Pehrsson S.J., Eglington B.M., Evans D.A.D. et al. Metallogeny and its link to orogenic style during the Nuna supercontinent cycle // Eds. Z.X. Li, D.A.D. Evans, J.B. Murphy. *Supercontinent Cycles through Earth History.* Geol. Soc., London, Spec.

Publ. 2016. V. 424. P. 83–94.

<https://doi.org/10.1144/SP424.5>

Pisarevsky S.A., Natapov L.M., Donskaya T.V. et al. Proterozoic Siberia: A promontory of Rodinia // *Precam. Res.* 2008. V. 160. P. 66–76.

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.016>

Srivastava R.K., Ernst R.E., Buchan K.L., De Kock M. Large Igneous Provinces and their Plumbing Systems // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 2022. V. 518.

<https://doi.org/10.1144/SP518-2021-167>

Thirlwall M.F. Long-term reproducibility of multicollector Sr and Nd isotope ratio analysis // *Chem. Geol.* 1991. V. 94. № 2. P. 85–104.

[https://doi.org/10.1016/0168-9622\(91\)90002-E](https://doi.org/10.1016/0168-9622(91)90002-E)

Wedepohl K.H., Hartmann G. The composition of the primitive upper Earth's mantle, kimberlites, related rocks and mantle xenoliths // Eds. H.O.A. Meyer, O.H. Leonardos, *Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.* 1994. V. 1. P. 486–495.

Xia L., Li X. Basalt geochemistry as a diagnostic indicator of tectonic setting // *Gondwana Res.* 2019. V. 65. P. 43–67.

<https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.08.006>

The First Discovery of Archean Dolerite Dikes in the Western Part of the Aldan Shield

K. G. Erofeeva¹, Yu. O. Larionova¹, A. V. Samsonov¹

¹*Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

In the western part of the Aldan terrane, in the middle reaches of the Tokko river, dolerite dikes have been studied. These dolerite dikes form a swarm of submeridional trend about 1 km wide. In the thickest dike, dolerites have well-preserved primary textural and structural features and mineral composition: plagioclase + pigeonite + augite + titanomagnetite. Dolerites from the chilled margins and inner parts of the dike are homogeneous in composition, correspond to low-Mg tholeiites, have low contents of Ti and other HFSE, with weak enrichments in light REE spectra and small negative Nb anomalies. Sm-Nd isotopic studies of magmatic dolerite minerals from the central part of the dike in isochron coordinates yielded a good linear correlation corresponding to an age of 2510 ± 64 Ma, which probably records the time of crystallization of the basaltic melt. The metadolerites in the shallow dike retain plagioclase-porphyrict structures, but the pyroxenes in them are completely replaced by amphibole and chlorite. Metadolerites are contrasted by low contents of MgO, Cr and Ni and higher contents of TiO₂, Fe₂O₃, P₂O₅, Nb and all REEs. The differences in the composition of the dikes may be related to the long-term (about 65%) crystallization differentiation of the initial melt and the flow of residual melt from the shallow intermediate magmatic chamber along the opening cracks. Such conditions probably existed in tectonically stable intraplate settings. The age of the studied dolerites of the dike swarm is comparable to that of the anorogenic granites of the Nelyuki Complex (~2.4–2.5 Ga), which are widespread in the western part of Aldan granulite-gneiss Terrane. The data obtained complement the characterization of the intraplate anorogenic magmatism that occurred in the western part of the Aldan Shield in the Late Archean and marked the final consolidation of a large block of Archean crust in the Chara-Olekma granite-greenstone area.

Keywords: dike swarms, Archean dolerites, Chara-Olekma granite-greenstone area