



## TWO STAGES OF THE CENOZOIC ALKALINE-BASALT VOLCANISM IN THE DARKHAD DEPRESSION (NORTHERN MONGOLIA) – GEOCHRONOLOGY, GEOCHEMISTRY, AND GEODYNAMIC CONSEQUENCES

S.S. Tsypukova<sup>1</sup>, A.B. Perepelov<sup>1</sup>✉, E.I. Demonterova<sup>2</sup>, A.V. Ivanov<sup>2</sup>, S.I. Dril<sup>1</sup>, M.I. Kuzmin<sup>1</sup>,  
A.V. Travin<sup>3</sup>, Yu.D. Shcherbakov<sup>1</sup>, M.Yu. Puzankov<sup>4</sup>, S.V. Kanakin<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

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

<sup>4</sup> Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 9 Piip Blvd, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

<sup>5</sup> Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

**ABSTRACT.** The isotopic data showed that there are two stages distinguished in the Cenozoic history of the Darkhad depression volcanic activity, the Late Oligocene initial stage (~28.0–26.6 Ma) and the final Late Miocene – Early Pliocene stage (~5.8–4.2 Ma). It has been stated that the rocks of the initial stage are only represented by trachybasalts; however, among the final-stage basaltoids there are series of shield-volcano hawaite-basanite-phonotephrite rocks and complex trachybasaltic "valley" lava flows, the formation of which is the last stage in the territorial volcanic evolution. It has been shown that the initial-stage trachybasaltic andesites are characterized by their enrichment of TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Sr, Zn, Ga and low concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CaO, Sc and HREE (La/Yb=27.2–30.2). Basaltoids of the final stage have a similar rare-element distribution and show an increase in the contents of TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, LILE, HFSE, Th, U and in the degree of fractionation of REE (La/Yb from 12.2 to 20.9) towards the rocks alkalinity enhancement. Modeling of eclogite, pyroxenite and peridotite melting processes in the La/Yb – Sm/Yb system shows that trachybasaltic andesite melts could be formed at ~7–8 % melting of eclogitic matter or at ~10–11 % melting of Grt-containing pyroxenites, with trachybasalt formed at ~3 % melting of Grt-containing peridotites. The composition distribution of rocks in coordinates (Mg# – Fe/Mn) indicates that the parental magmas are the initial-stage trachybasaltic andesite magmas as well as the Early Pliocene trachybasaltic "valley" lava flows. Sr, Nd, Pb isotope characteristics of the Darkhad depression basaltoids show significant shift of isotopic ratios in time towards the relatively enriched mantle as compared with the depleted MORB mantle. The initial formation of trachybasaltic andesite melts occurred in the Late Oligocene at the pre-rift stage of the territory development involving metasomatized mantle matter, with the pyroxenite or eclogite component contained in the magma formation source. The origin of trachybasalt magmas of the final stage is associated with the processes of decompression melting of peridotites in a weakly metasomatized lithospheric mantle at the rift stage of the Darkhad structure development.

**KEYWORDS:** Cenozoic volcanism; Darkhad depression; Northern Mongolia; geochronology; mineralogy; geochemistry

**FUNDING:** The research was carried out within the state assignment (0284-2021-0007), and RFBR (grant 20-05-00116) of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, and the state assignment of the Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS. This work involved the equipment of the "Geodynamics and Geochronology" Shared Research Facilities of the Institute of the Earth's Crust SB RAS (grant 075-15-2021-682).

### RESEARCH ARTICLE

Received: December 10, 2021

Revised: April 25, 2022

Accepted: May 16, 2022

**Correspondence:** Alexander B. Perepelov, [alper@igc.irk.ru](mailto:alper@igc.irk.ru)

**FOR CITATION:** Tsypukova S.S., Perepelov A.B., Demonterova E.I., Ivanov A.V., Dril S.I., Kuzmin M.I., Travin A.V., Shcherbakov Yu.D., Puzankov M.Yu., Kanakin S.V., 2022. Two Stages of the Cenozoic Alkaline-Basalt Volcanism in the Darkhad Depression (Northern Mongolia) – Geochronology, Geochemistry, and Geodynamic Consequences. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (3), 0613. doi:10.5800/GT-2022-13-3-0613

## ДВА ЭТАПА КАЙНОЗОЙСКОГО ЩЕЛОЧНО-БАЗАЛЬТОВОГО ВУЛКАНИЗМА ДАРХАТСКОЙ ВПАДИНЫ (СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ) – ГЕОХРОНОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

С.С. Цыпукова<sup>1</sup>, А.Б. Перепелов<sup>1</sup>, Е.И. Демонтерова<sup>2</sup>, А.В. Иванов<sup>2</sup>, С.И. Дриль<sup>1</sup>, М.И. Кузьмин<sup>1</sup>,  
А.В. Травин<sup>3</sup>, Ю.Д. Щербаков<sup>1</sup>, М.Ю. Пузанков<sup>4</sup>, С.В. Канакин<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

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

<sup>4</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия

<sup>5</sup> Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

**АННОТАЦИЯ.** На основе данных изотопного датирования в кайнозойской истории вулканической активности Дархатской впадины Северной Монголии выделены два этапа – инициальный позднеолигоценый этап (~28.0–26.6 млн лет) и заключительный позднемиоцен-раннеплиоценовый этап (~5.8–4.2 млн лет). Установлено, что породы раннего инициального этапа представлены исключительно трахиандезибазальтами, а среди базальтоидов заключительного этапа выделяется гавайит-базанит-фонотефритовая серия пород щитовых вулканических построек и комплекс трахибазальтов «долинных» лавовых толщ, формирование которых завершает вулканическое развитие территории. Показано, что для трахиандезибазальтов инициального этапа характерными являются их относительное обогащение  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ , Sr, Zn, Ga и низкие концентрации  $Al_2O_3$ , MnO, CaO, Sc и HREE ( $La/Yb=27.2-30.2$ ). Базальтоиды заключительного этапа демонстрируют рост содержания  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $P_2O_5$ , LILE, HFSE, Th, U и увеличение степени фракционирования REE ( $La/Yb$  от 12.2 до 20.9) в направлении увеличения щелочности пород. Моделирование процессов плавления эклогитов, пироксенитов и перидотитов в системе  $La/Yb - Sm/Yb$  показывает, что трахиандезибазальтовые расплавы могли быть сформированы при ~7–8%-ном плавлении эклогитового вещества или ~10–11%-ном – Grt-содержащих пироксенитов, а трахибазальтовые расплавы образуются при ~2–3%-ном плавлении Grt-содержащих перидотитов. Распределение составов пород в координатах  $Mg\# - Fe/Mn$  указывает на то, что к исходным магмам относятся трахиандезибазальты инициального этапа и раннеплиоценовые трахибазальты «долинных» лавовых толщ. Изотопные характеристики Sr, Nd и Pb базальтоидов Дархатской впадины демонстрируют значимое смещение значений изотопных отношений во времени в направлении от относительно обогащенной мантии к деплетированной мантии MORB типа. Формирование трахиандезибазальтовых расплавов на инициальном этапе происходило в позднем олигоцене на предрифтовой стадии развития территории с вовлечением в область магмообразования вещества метасоматизированной мантии с участием пироксенитового или эклогитового компонента. Происхождение позднемиоцен-раннеплиоценовых щелочно-базальтовых магм заключительного этапа связано с процессами декомпрессионного плавления перидотитов слабометасоматизированной литосферной мантии на рифтогенной стадии развития Дархатской структуры.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** кайнозойский вулканизм; Дархатская впадина; Северная Монголия; геохронология; минералогия; геохимия

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследования выполнены в рамках государственного задания по теме НИР № 0284-2021-0007 и гранта РФФИ № 20-05-00116 Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, а также по теме государственного задания Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. В работе задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

За последние ~30 млн лет на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) сформированы многочисленные вулканические ареалы с проявлениями щелочно-базальтовых магм [Rasskazov et al., 2002; Yarmolyuk et al., 2003; Demonterova et al., 2007; Tsypukova et al., 2014; Ivanov et al., 2015]. Кайнозойская вулканическая активность в этом регионе не была непрерывной и проявлялась на дискретных временных интервалах, каждый из которых сопоставляется с теми или иными

стадиями геодинамического развития БРЗ. Ранее по имеющимся геохронологическим данным [Yarmolyuk et al., 2003] на юго-западном фланге БРЗ был выделен целый ряд этапов вулканической активности, начиная с позднеолигоценового и заканчивая позднеплиоцен-плейстоцен-голоценовым. При этом развитие внутриплитного кайнозойского вулканизма на этой территории связывалось с процессами плюмовой геодинамики [Zorin et al., 2003] или с активностью Центрально-Азиатского горячего поля мантии [Yarmolyuk et al., 2003].

Согласно другой модели [Ivanov et al., 2015], формирование структуры БРЗ и сопровождающий ее вулканизм определялись главным образом процессами пассивного рифтогенеза в обстановке взаимодействия литосферных плит с магмообразованием в условиях декомпрессионного плавления мантии. В рамках этой концепции в пределах кайнозойского временного интервала выделяются стадии рифтогенеза с соответствующими им этапами вулканической активности. Это позднеоцено-олигоценая переходная рифтовая стадия с редкими проявлениями вулканизма, а также наиболее продуктивная по объемам изверженного материала раннемиоцен-плиоцен-голоценовая собственно рифтовая стадия. Следует отметить, что каких-либо закономерностей эволюции кайнозойского вулканизма во времени ранее не отмечалось.

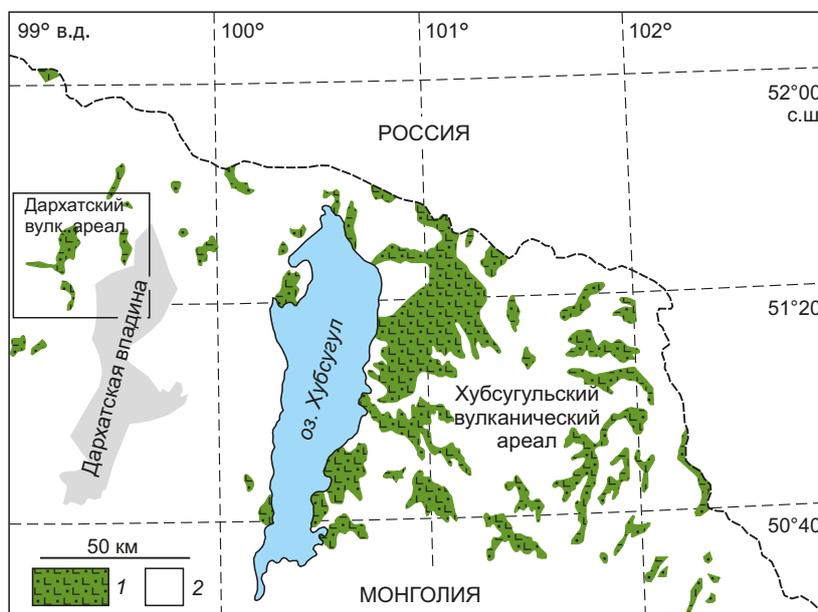
Предметом данного исследования является кайнозойский щелочно-базальтовый вулканизм северо-западного фланга Дархатской впадины, расположенной в Северной Монголии к западу от озера Хубсугул (рис. 1). Как показали новые геохронологические данные, формирование кайнозойских вулканогенных толщ происходило здесь на двух разобценных во времени этапах. Это позднеолигоценый и позднемиоцен-раннеплиоценовый этапы, разделенные между собой временным интервалом протяженностью ~20 млн лет, в течение которого вулканическая активность практически не проявлялась. Минералого-геохимические характеристики указывают на то, что вулканические комплексы пород выделяемых этапов заметно различаются по составам.

Это позволяет провести их корреляцию с историей геодинамического развития структуры БРЗ, определить условия магмообразования и направленность вещественной эволюции вулканизма во времени.

## 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Данные по вулканическим породам Дархатской впадины получены в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск), ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск), ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) и ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Геохронологические исследования были выполнены  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом на масс-спектрометрах «ARGUS VI» (ИЗК СО РАН) и «ARGUS» (ИГМ СО РАН). Изотопные характеристики Sr и Nd для пород Дархатской впадины получены в ИЗК СО РАН с использованием мультиколлекторного масс-спектрометра с термической ионизацией Finnigan MAT 262 (Thermo Fisher Scientific) и в ИГХ СО РАН с использованием XRF спектрометра «S4 Pioneer» (главные компоненты), ICP-MS масс-спектрометров «ELEMENT 2», «NexION 300D» и масс-спектрометра «MC-ICP-MS NEPTUNE» (редкие элементы, изотопия Sr, Nd, Pb). Минералогические исследования проведены на растровом электронном микроскопе «LEO-1430VP» с системой микроанализа «INCA Energy 350» (ГИН СО РАН), на электронно-зондовом микроанализаторе «JEOL Superprobe JXA8200» и сканирующем электронном микроскопе «Tescan MIRA 3 LMH» с системой



**Рис. 1.** Схема локализации позднекайнозойских вулканических ареалов на флангах Хубсугульской и Дархатской впадин Северной Монголии.

1 – кайнозойские вулканические ареалы Северной Монголии; 2 – исследованный участок проявлений кайнозойского вулканизма на северо-западном фланге Дархатской впадины (рис. 2).

**Fig. 1.** Localization of the Late Cenozoic volcanic fields at the flanks of Lake Hovsgol/Darkhad depression of Northern Mongolia.

1 – Late Cenozoic volcanic fields of Northern Mongolia; 2 – study area with the Cenozoic volcanic occurrences in the northwestern Darkhad depression (Fig. 2).

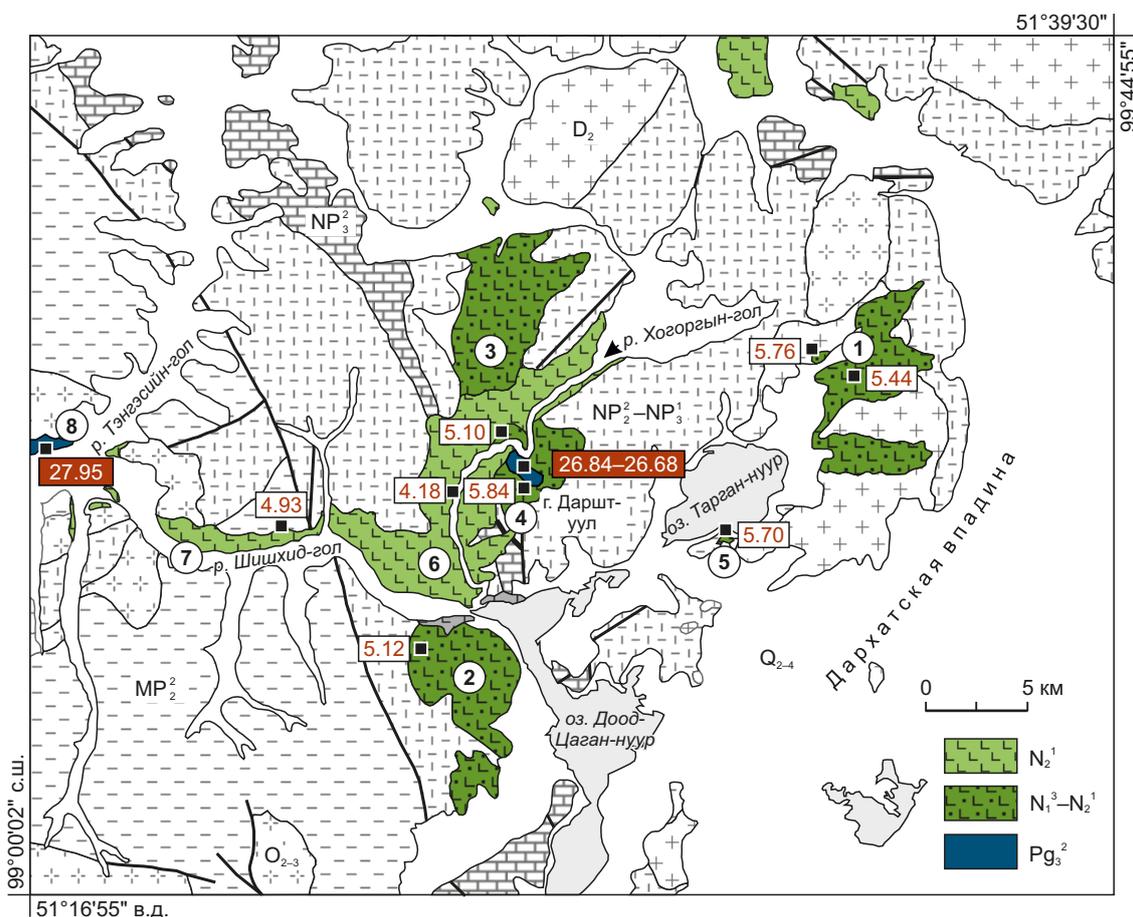
энергодисперсионного микроанализа «AztecLive Advanced Ultim Max 40» (ИГХ СО РАН).

### 3. ГЕОЛОГИЯ И ГЕОХРОНОЛОГИЯ

Дархатская впадина является одной из крупнейших тектонических структур субмеридионального заложения на юго-западном фланге БРЗ (см. рис. 1). Впадина представляет собой рифтогенный прогиб протяженностью до 120 км с севера на юг и до 35–45 км с запада на восток. В северном секторе впадины и на участках, прилегающих к структуре с северо-запада, локализованы кайнозойские вулканогенные комплексы. Они залегают на мезоэопротерозойском метаморфизованном вулканогенно-осадочном фундаменте с немногочисленными массивами палеозойских гранитных интрузий (рис. 2). Первые результаты изотопного датирования базальтоидов вулканогенных толщ Дархатской впадины (K/Ar) содержатся в работе [Yarmolyuk et al., 2003].

Они показали исключительно широкий временной диапазон формирования развитых здесь вулканогенных комплексов, от позднего олигоцена и до позднего миоцена (23.90–21.60–10.30–6.80–5.75 млн лет). При этом по сведениям, приведенным в работе [Logachev, 2003], можно предположить, что формирование собственно Дархатской впадины происходило на поздней стадии «быстрого рифтинга» в БРЗ начиная с временной границы миоцена и плиоцена.

Новые данные  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования вулканических пород Дархатской впадины получены авторами для 11 образцов (рис. 3). В результате датирования выделено два главных этапа вулканической активности структуры. Это позднеолигоценовый этап (3 образца, 27.95, 26.84 и 26.68 млн лет) (рис. 3) и позднемиоцен-раннеплиоценовый этап (8 образцов в диапазоне 5.84–4.18 млн лет). В пределах позднемиоцен-раннеплиоценового этапа в соответствии с формами проявления



**Рис. 2.** Схема геологического строения северо-западного фланга Дархатской впадины (по данным геолого-съёмочных работ с дополнениями авторов).

$Q_{2-4}$  – среднепозднеплейстоценовые и голоценовые аллювиальные, озерные и водно-ледниковые отложения;  $N_2^1$  – раннеплиоценовые лавовые комплексы (трахибазальты);  $N_1^3-N_2^1$  – позднемиоцен-раннеплиоценовые лавовые комплексы (гавайиты, базаниты, фонотефриты);  $Pg_3^2$  – позднеолигоценовые лавовые комплексы и субвулканические тела (трахиандезибазальты);  $D_2$  – среднедевонские интрузивные комплексы (граниты, лейкограниты, кварцевые сиениты, граносиениты);  $O_{2-3}$  – средне- и позднеордовикские интрузивные комплексы (диориты, гранодиориты, граниты);  $NP_3^2$  – позднеэопротерозойские кремнисто-карбонатные осадочно-метаморфические комплексы (доломиты, известняки, кремни, фосфориты);  $NP_2^2-NP_3^1$  – средне-позднеэопротерозойские вулканогенно-осадочные и метаморфические комплексы (андезитовые, дацитовые, липаритовые

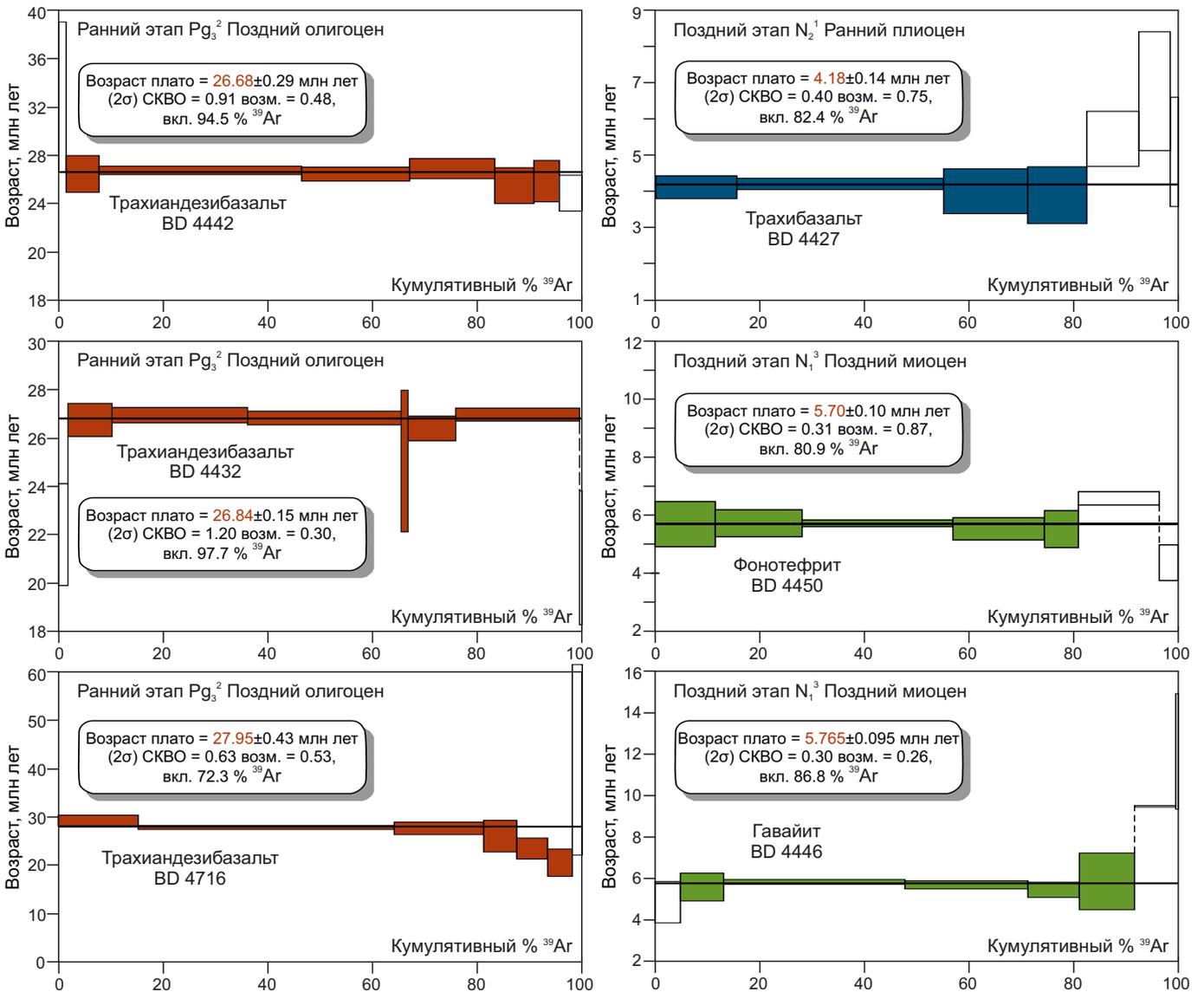
порфириты, туфы, песчаники, алевролиты, гравелиты, филлиты, серицитовые сланцы);  $MP_2^2$  – среднеэопротерозойские метаморфические комплексы (хлоритовые, актинолитовые, эпидотовые и серицитовые сланцы).

Вулканические толщи и постройки: 1 – район р. Бэдуурийн-гол, 2 – г. Их Усам-уул, 3 – г. Ноорт-уул, 4 – г. Даршт-уул, 5 – южный берег оз. Тарган нуур, 6 – р. Хогоргын-гол, 7 – долина р. Шишхид-гол, 8 – правый борт р. Тэнгэсийн-гол в месте впадения в р. Шишхид-гол. Утолщенные линии – разломы. На схеме показаны места отбора образцов вулканических пород и результаты их датирования  $^{40}Ar/^{39}Ar$  методом (млн лет). Приведены координаты границ геологической схемы.

**Fig. 2.** Geological structure of the northwestern Darkhad depression (drawn after the geological survey data supplemented by the results obtained).

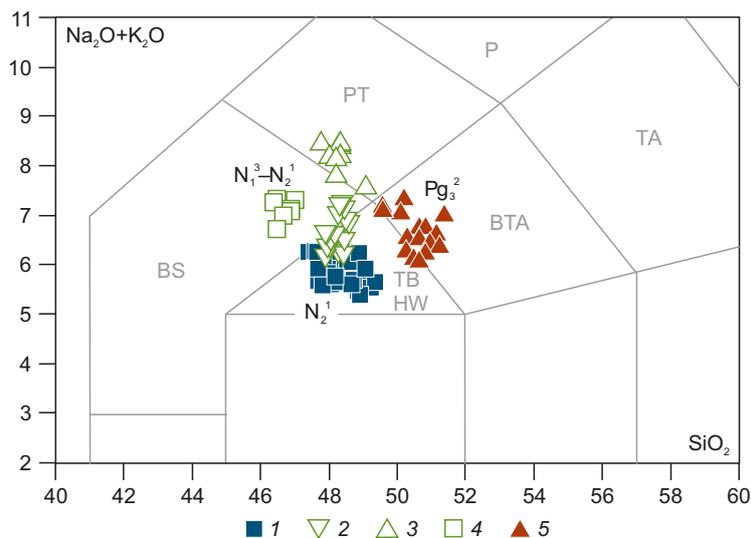
$Q_{2-4}$  – Middle-Late Pleistocene and Holocene alluvial, lacustrine and glacial deposits;  $N_2^1$  – Early Pliocene lava complexes (trachybasalts);  $N_1^3-N_2^1$  – Late Miocene – Early Pliocene lava complexes (hawaiites, basanites, phonotephrites);  $Pg_3^2$  – Late Oligocene lava complexes and subvolcanic bodies (basaltic trachyandesites);  $D_2$  – Middle Devonian intrusions (granites, leucogranites, quartz syenites, granosyenites);  $O_{2-3}$  – Middle-Late Ordovician intrusions (diorites, granodiorites, granites);  $NP_3^2$  – Late Neoproterozoic silico-carbonate sedimentary complexes (dolomites, limestones, flintstones, phosphorites);  $NP_2^2-NP_3^1$  – Middle-Late Proterozoic volcano-sedimentary and metamorphic complexes (andesitic, dacitic and liparitic porphyrites, tufts, sandstones, siltstones, gravellites, phillites, sericite schists);  $MP_2^2$  – Middle Mesoproterozoic metamorphic complexes (chlorite, actinolite, epidote and sericite schists).

Volcanic units and structures: 1 – Bedooriin-Gol River area, 2 – Ikh Usam-Uul Mt., 3 – Noort-Uul Mt., 4 – Darsht-Uul Mt., 5 – southern bank of Lake Targan Noor, 6 – Khogorgyn-Gol River, 7 – Shishhid-Gol River valley, 8 – right bank of the Tengesiyn-gol River at the confluence into the Shishhid-Gol River, thick lines are faults. Volcanic-rock sampling sites and  $^{40}Ar/^{39}Ar$  ages (Ma) are indicated.



**Рис. 3.** Результаты  $^{40}Ar/^{39}Ar$  изотопного датирования кайнозойских вулканических пород северо-западного фланга Дархатской впадины.

**Fig. 3.**  $^{40}Ar/^{39}Ar$  dating results for Cenozoic volcanic rocks of the northwestern Darkhad depression.



**Рис. 4.** Классификационная диаграмма  $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  составов кайнозойских вулканических пород северо-западного фланга Дархатской впадины.

Диаграмма приведена по [Le Bas et al., 1986], оксиды в вес. %. Поля составов пород на диаграмме: ТВ – трахибазальты и HW – гавайиты, BTA – трахиандезибазальты, TA – трахиандезиты, BS – базаниты, PT – фонотефриты, P – фонолиты. Условные обозначения точек составов вулканических пород Дархатской впадины: 1 – трахибазальты раннеплиоценовых «долинных» лавовых толщ; 2 – гавайиты; 3 – фонотефриты и 4 – базаниты позднемиоцен-раннеплиоценовых щитовых вулканических построек; 5 – трахибазальты инициального позднеолигоценового этапа вулканической активности.

**Fig. 4.** Classification diagram  $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  for compositions of the Cenozoic volcanic rocks in the northwestern Darkhad depression (after [Le Bas et al., 1986]).

Oxides are displayed in wt. %. Composition fields: TB – trachybasalts and HW – hawaiites, BTA – basaltic trachyandesites, TA – trachyandesites, BS – basanites, PT – phonotephrites, P – phonolites. For other symbols, see [Le Bas et al., 1986]. Studied samples: 1 – trachybasalts of the Early Pliocene "valley" lava flows; 2 – hawaiites; 3 – phonotephrites; 4 – basanites of the Late Miocene – Early Pliocene shield volcanoes; 5 – trachybasalts of the initial Late Oligocene volcanic activity.

вулканической активности могут быть выделены лавовые комплексы небольших щитовых построек позднемиоцен-раннеплиоценового возраста (5.84–5.10 млн лет, 6 образцов) и раннеплиоценовые комплексы «долинных» лавовых потоков с их общей протяженностью до 30 км (4.93–4.18 млн лет, 2 образца).

Вулканогенные комплексы позднеолигоценового возраста на северо-западном фланге Дархатской впадины в одном случае представляют собой разрушенные лавовые потоки в восточном подножии г. Даршт-уул, в другом – они обнаружены вблизи устья и на правобережье р. Тэнгисийн-гол, правого притока р. Шишхид-гол, в виде крупного фрагмента лавовой толщи мощностью до 150 м. Породы позднеолигоценового этапа представлены трахиандезибазальтами (рис. 4).

Лавовые комплексы позднемиоцен-раннеплиоценовых щитовых вулканических построек мощностью до 130 м были установлены вблизи западного борта оз. Дод Цаган нуур, на водораздельных поднятиях бассейна р. Хогоргын-гол в ее среднем течении и в бассейне р. Бэдуурийн-гол. На южном берегу оз. Тарган нуур на этом возрастном этапе был сформирован лавовый купол с субвулканическими телами и дайками. Фрагменты лавовых толщ этого этапа фиксируются на относительно высоких гипсометрических уровнях современного рельефа (1800–1950 м) и принадлежат, по меньшей мере, четырем центрам извержений. Породы щитовых

вулканических построек наиболее разнообразны по составам и представлены гавайитами, базанитами и фонотефритами (рис. 4).

Раннеплиоценовый «долинный» комплекс наблюдается в виде протяженных лавовых потоков и их фрагментов в долине р. Шишхид-гол и обширных лавовых покровов в бассейне ее правого притока, р. Хогоргын-гол. На современном эрозионном срезе мощность лавовой толщи достигает 40–60 м. Лавовые потоки этого комплекса в сравнении с щитовыми постройками прослеживаются на более низких высотных отметках – 1660–1540 м. С небольшими вариациями все вулканические породы раннеплиоценовых «долинных» лавовых толщ отвечают по составам трахибазальтам (рис. 4).

#### 4. МИНЕРАЛОГИЯ

Среди вулканических пород Дархатской впадины по особенностям состава минеральных парагенезисов выделены три группы. Эти группы пород находятся в полном соответствии с возрастными этапами или формами их проявления.

Две разновозрастные группы пород, а именно трахиандезибазальты позднеолигоценового инициального этапа и трахибазальты раннеплиоценовых «долинных» лавовых толщ заключительного этапа, имеют мелкопорфировые структуры и  $\text{Ol} \pm \text{Crpx}$  парагенезис минералов вкрапленников ( $\text{Fo}_{80-68} \pm \text{Wo}_{42-46}$ ,  $\text{Fs}_{11-16}$  и  $\text{Fo}_{83-71}$

соответственно). В виде включений в ОI в трахианде-зибазальтах и трахибазальтах содержится хромистая шпинель ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  20–33 и 24–26 мас. % соответственно) и Ni-содержащий пирротин ( $\text{NiO}$  0.61–2.61 мас. %), в центральных зонах вкрапленников ОI из трахианде-зибазальтов установлены также включения кальцита. Основная масса пород этих двух групп сложена микролитами ОI, Срх, Pl, TiMgt, Ilm и содержит интерстиционные выделения нефелиновых твердых растворов ( $\text{Ne}_{69-78} \text{Ks}_{4-13} \text{Qtz}_{11-21}$ ).

Третья группа пород, объединяющая гавайиты, базаниты и фонотефриты позднемиоцен-раннеплиоценовых щитовых вулканических построек, выделяется своими порфиловыми структурами и Pl-содержащим парагенезисом минералов вкрапленников (Pl+Ol+Срх). Составы вкрапленников этой группы пород заключены в интервалах  $\text{An}_{64-48} \text{Or}_{1-3}$  (Pl),  $\text{Fo}_{76-55}$  (Ol) и  $\text{Wo}_{46-49} \text{Fs}_{8-14}$  (Срх). Во вкрапленниках ОI содержатся включения низкохромистой Sp ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  1–5 мас. %) и TiMgt. В основной массе пород развиты микролиты Pl, Ol, Срх, TiMgt и Ilm, а в виде интерстиций содержатся нефелиновые твердые растворы ( $\text{Ne}_{70-77} \text{Ks}_{5-11} \text{Qtz}_{15-20}$ ) и, реже, Kfs ( $\text{Or}_{85-88}$ ).

Фонотефриты этой группы отличаются наличием включений в ОI пирротина ( $\text{NiO}$  0.40–1.33 мас. %), вкрапленников и субфенокристаллов лейцита (Lc), а также микролитов и субфенокристаллов Ap (Cl 0.32–0.70, F 2.56–4.47 мас. %) и Ne ( $\text{Ne}_{81-89} \text{Ks}_{7-11} \text{Qtz}_{4-9}$ ). Особенность минерального состава базанитов – наличие крупного резорбированного Срх ( $\text{Wo}_{45-49} \text{Fs}_{11-14}$ ) с включениями ОI ( $\text{Fo}_{73-72}$ ).

Растровый электронно-зондовый анализ остаточной основной массы исследованных вулканических пород показывает, что она имеет субщелочной состав для группы трахибазальтов и трахианде-зибазальтов и щелочной фонотефритовый и тефрифенолитовый состав в гавайитах, базанитах и фонотефритах.

## 5. СОСТАВ ПОРОД

Вулканические породы северо-западного фланга Дархатской впадины относятся к субщелочной и щелочной K-Na серии (рис. 4) и близки по составам к базальтам OIB типа ( $\text{Ba}/\text{Nb}=6.0\text{--}9.2$ ,  $\text{La}/\text{Nb}=0.45\text{--}0.57$ ). Все без исключения исследованные породы структуры имеют Ne-нормативный состав ( $\text{Ne}_N=0.2\text{--}14.3\%$ ) (табл. 1).

**Таблица 1.** Представительные составы кайнозойских вулканических пород северо-западного фланга Дархатской впадины  
**Table 1.** Compositions of the representative Cenozoic volcanic rock samples from the northwestern Darkhad depression

Образец	BD-4432	BD-4442	BD-4716	№ sam.	BD-4432	BD-4442	BD-4716
N 51°	28'22.2"	27'56.3"	28'57.2"	Ga	24.1	24.5	25.4
E 99°	19'59.8"	20'59.4"	01'09.1"	Rb	26	27	23
Порода	ВТА	ВТА	ВТА	Sr	1209	1226	1219
Возраст, млн лет	26.8	26.7	28.0	Y	20	20	20
SiO <sub>2</sub>	50.21	50.65	50.27	Zr	230	225	240
TiO <sub>2</sub>	2.86	2.54	2.75	Nb	63	62	64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.29	14.56	14.51	Sn	3.1	2.9	3.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.57	3.95	3.06	Cs	0.35	0.49	0.17
FeO	6.47	5.75	7.00	Ba	425	425	445
MnO	0.125	0.126	0.134	La	32.2	30.3	32.7
MgO	6.06	6.55	6.36	Ce	73.1	67.9	74.9
CaO	6.54	6.89	7.10	Pr	9.71	8.98	10.22
Na <sub>2</sub> O	5.15	4.56	4.23	Nd	41.1	38.6	43.2
K <sub>2</sub> O	2.28	2.23	2.09	Sm	9.08	8.73	9.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.03	0.95	0.96	Eu	2.76	2.60	2.84
П.п.п.	0.53	1.01	1.37	Gd	7.45	7.05	7.71
Сумма	100.11	99.77	99.83	Tb	1.00	0.94	1.00
Mg#	0.53	0.56	0.54	Dy	4.63	4.64	4.76
Ne <sub>N</sub>	5.4	2.1	0.2	Ho	0.73	0.73	0.75
Li	10.8	11.2	12.0	Er	1.61	1.60	1.70
Be	2.29	2.23	2.26	Tm	0.20	0.20	0.21
Sc	11	11	11	Yb	1.11	1.11	1.15
V	135	133	131	Lu	0.15	0.15	0.16
Cr	148	154	141	Hf	5.10	5.50	4.99
Co	34	37	38	Ta	3.44	3.11	3.44
Ni	97	94	102	Pb	2.36	2.20	2.30
Cu	31	25	30	Th	2.68	2.65	2.79
Zn	133	134	134	U	0.79	0.86	0.63

Таблица 1 (продолжение)

Table 1 (continued)

Образец	BD-4446	BD-4450	BD-4427	№ sam.	BD-4446	BD-4450	BD-4427
N 51°	31'46.4"	26'30.5"	27'35.4"	Ga	21.9	24.3	20.6
E 99°	33'25.7"	28'42.4"	17'32.0"	Rb	25	30	20
Порода	HW	PT	TB	Sr	869	964	610
Возраст, млн лет	5.8	5.7	4.2	Y	22	24	21
SiO <sub>2</sub>	48.17	48.29	49.04	Zr	226	276	179
TiO <sub>2</sub>	2.30	2.40	2.15	Nb	54	71	40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.41	18.55	15.70	Sn	2.0	2.7	1.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.94	4.77	1.96	Cs	0.37	0.40	0.21
FeO	7.54	5.21	8.44	Ba	3685	480	276
MnO	0.155	0.148	0.151	La	26.3	32.9	20.5
MgO	6.67	3.68	7.75	Ce	57.0	68.1	45.3
CaO	7.78	6.98	7.78	Pr	7.20	8.39	5.79
Na <sub>2</sub> O	4.33	5.37	4.13	Nd	30.87	33.2	23.7
K <sub>2</sub> O	2.26	3.10	1.75	Sm	6.70	7.12	5.43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.65	0.81	0.49	Eu	1.95	2.17	1.70
П.п.п.	0.73	0.69	0.69	Gd	5.69	6.14	5.09
Сумма	99.93	99.99	100.02	Tb	0.83	0.88	0.75
Mg#	0.54	0.41	0.58	Dy	4.57	4.72	4.29
Ne <sub>N</sub>	7.4	13.2	8.6	Ho	0.83	0.87	0.80
Li	9.6	10.6	12.0	Er	2.04	2.11	1.96
Be	2.30	2.94	1.77	Tm	0.27	0.28	0.26
Sc	16	11	19	Yb	1.58	1.62	1.53
V	178	170	163	Lu	0.21	0.22	0.21
Cr	138	15	181	Hf	4.75	5.27	3.95
Co	39	27	43	Ta	2.98	3.87	2.29
Ni	72	14	105	Pb	2.24	2.94	2.08
Cu	29	30	36	Th	2.79	3.67	2.17
Zn	101	100	114	U	0.88	1.24	0.72

Примечание. Содержания петрогенных оксидов в вес. %, редких элементов – в ppm. 51° с.ш. и 99° в.д. – GPS-координаты отбора образцов пород. BTA – трахиандезибазаальт, HW – гавайит, PT – фонотефрит, TB – трахибазаальт. Возраст – млн лет. Mg# = Mg/(Mg+FeO<sub>total</sub>) (мол. %) – коэффициент магнезиальности пород. Ne<sub>N</sub> – нормативный нефелин (%). Дополнительные сведения о вещественном составе вулканических пород Дархатской впадины могут быть получены по запросу на адрес [alper@igc.irk.ru](mailto:alper@igc.irk.ru).

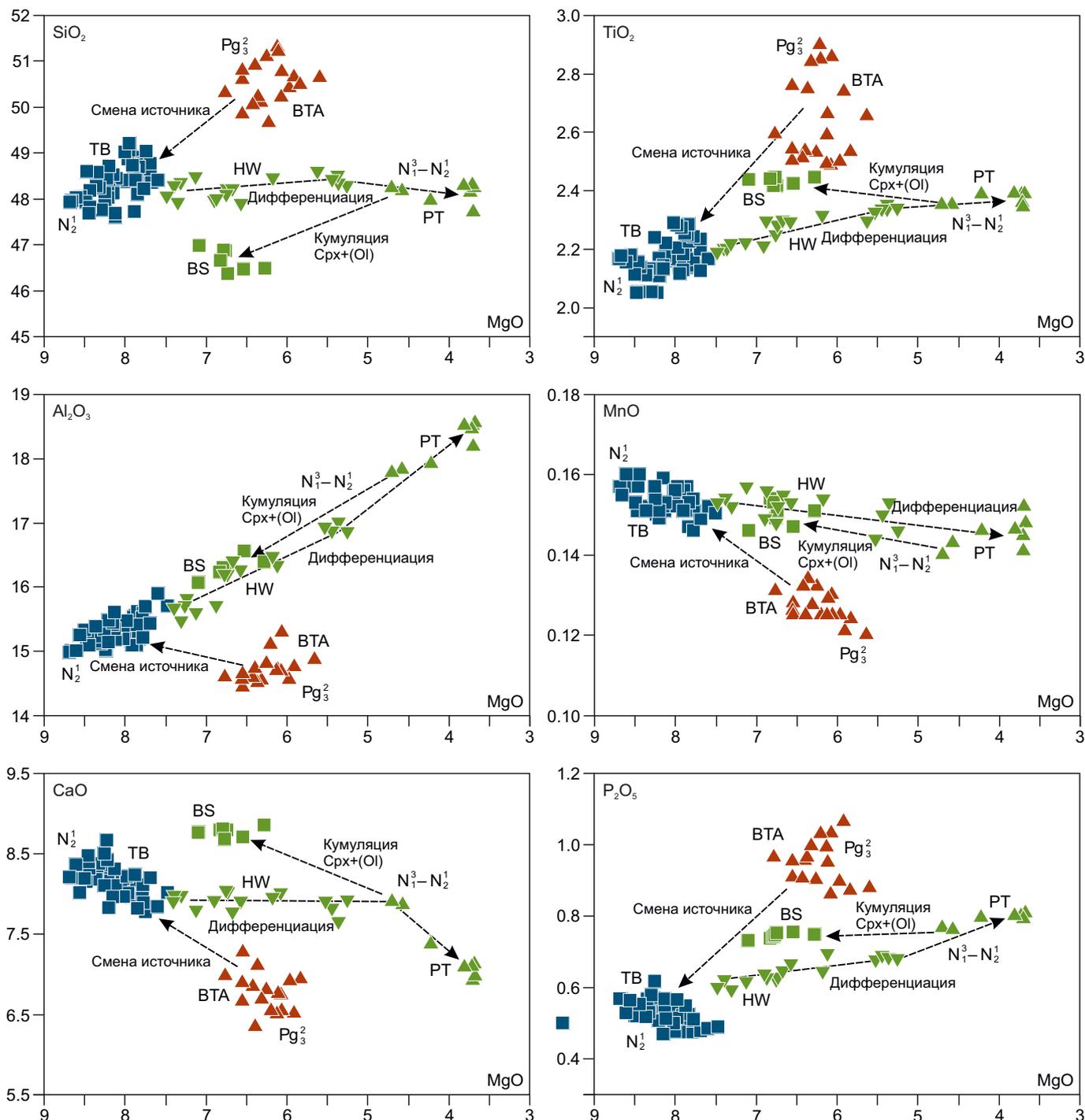
Note. The contents of petrogenic oxides are calculated in wt. %, those of rare elements – in ppm. N 51° and E 99° are the GPS coordinates of rock sampling sites. BTA is basaltic trachyandesite, HW – hawaiite, PT – phonotephrite, TB – trachybasalt. Age is displayed in million years. Mg# = Mg/(Mg+FeO<sub>total</sub>) (mol. %) is magnesium coefficient of rocks. Ne<sub>N</sub> is normative nepheline (%). Additional information on the rock compositions is available on request to [alper@igc.irk.ru](mailto:alper@igc.irk.ru).

Трахиандезибазаальты позднеолигоценного этапа в сравнении с составами пород позднемиоцен-раннеплиоценового этапа имеют специфические вещественные характеристики. Они отличаются не только относительно более высокой кремнекислотностью, но и значительно более низкими содержаниями Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CaO, Sc и HREE (рис. 5, 6). Для них также характерны более высокие концентрации TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Sr, Zn, Ga и высокая степень фракционирования REE (La/Yb=27.2–30.2). На графиках нормированных концентраций составы трахиандезибазаальтов демонстрируют относительное обеднение Zr и Hf (рис. 6).

Вещественные характеристики базальтоидов позднемиоцен-раннеплиоценового этапа вулканизма Дархатской впадины указывают на то, что все типы пород

этого этапа, а именно трахибазаальты, гавайиты, базаниты и фонотефриты, несмотря на различия в распределении петрогенных оксидов (см. рис. 5), обладают сходным характером относительного распределения редких элементов на графиках нормированных концентраций (рис. 6). При этом с ростом щелочности пород от трахибазаальтов до фонотефритов в них возрастают содержания TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, многих LILE (Rb, Ba), HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf) и радиоактивных элементов (Th, U), а также увеличивается степень фракционирования REE (La/Yb от 12.2 до 20.9) (табл. 1; рис. 6).

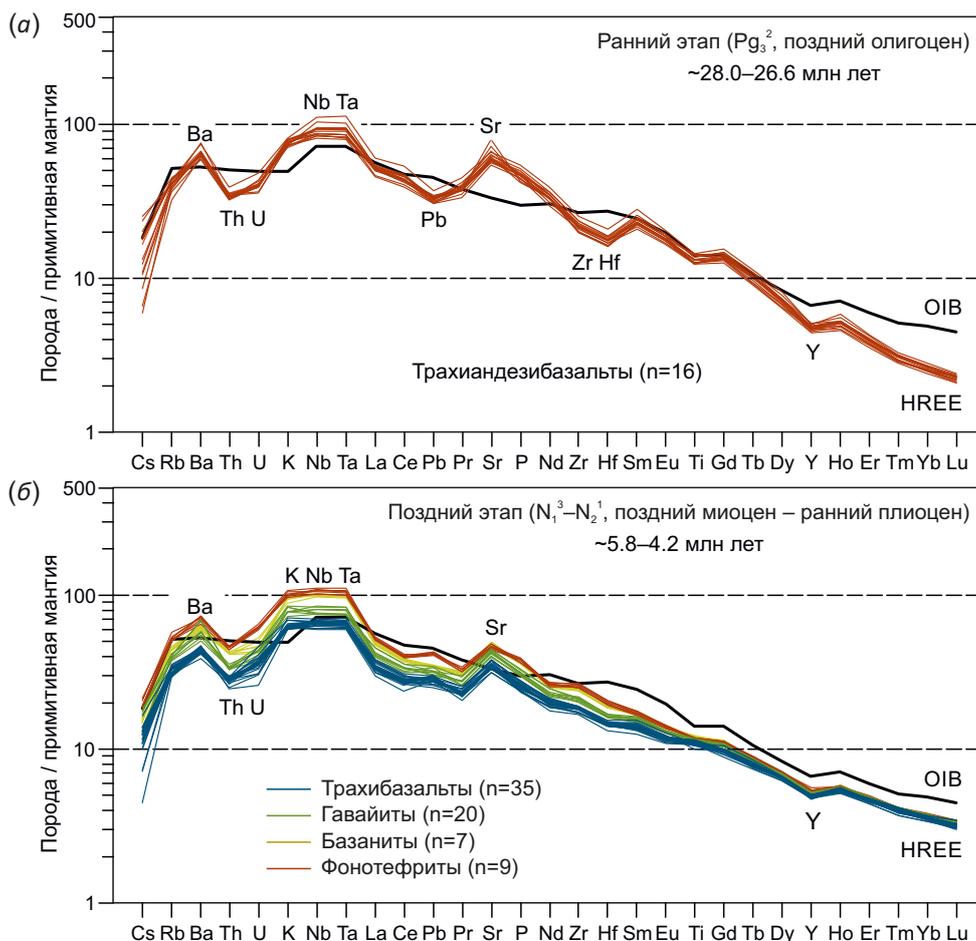
Гавайиты щитовых построек, в сравнении с трахибазаальтами «долинных» лавовых толщ, обладают более высокими содержаниями Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и элементов



**Рис. 5.** Диаграммы распределения петрогенных оксидов (вес. %) в кайнозойских вулканических породах северо-западного фланга Дархатской впадины.

Условные обозначения точек составов пород см. на рис. 4. Значения по оси MgO приведены в обратном порядке. Линиями показаны предполагаемые направления эволюции составов вулканических пород для условий смены источников магм, протекания процессов кристаллизационной дифференциации и формирования базанитов в результате кумулятивного обогащения расплавов Срх и Ol.

**Fig. 5.** Distribution of petrogenetic oxides (wt. %) in Cenozoic volcanic rocks of the northwestern Darkhad depression. Symbols are the same as in Fig. 4. MgO-axis values are displayed in the reverse order. Lines show the inferred directions of the evolution of volcanic rock composition under conditions of change of magma sources, crystallization differentiation processes and basanite formation as a result of cumulative enrichment in Cpx and Ol melts.



**Рис. 6.** Распределение магматофильных элементов в базальтоидах инициального позднеолигоценового (а) и заключительного позднемиоцен-раннеплиоценового (б) этапов вулканизма северо-западного фланга Дархатской впадины. Составы пород (ppm) нормированы на состав примитивной мантии по [McDonough, Sun, 1995]. Состав OIB приведен по [Sun, McDonough, 1989]. На диаграмме: n – количество образцов.

**Fig. 6.** Distribution pattern of magmatophile elements in the initial Late Oligocene (a) and final Late Miocene – Early Oligocene (b) basaltoids of the northwestern Darkhad depression.

Rock compositions (ppm) are normalized to the composition of the primitive mantle after [McDonough, Sun, 1995]. OIB composition is based on [Sun, McDonough, 1989]. n – number of samples.

LILE, LREE и HFSE групп (La/Yb=16.1–18.0 против 12.2–15.2) (см. рис. 5; рис. 6). В отличие от гавайитов, «долинные» трахибазальты характеризуются повышенными концентрациями Co, Cr и Ni и более высокой магнезиальностью (Mg# 0.54–0.60) (табл. 1). Фонотефриты среди всех других типов базальтоидов Дархатской впадины выделяются наиболее высокой суммарной щелочностью, высокими концентрациями в них Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и большинства LILE, HFSE и LREE элементов (La/Yb=20.0–20.9) (табл. 1; см. рис. 5; рис. 6).

### 6. ИЗОТОПНЫЕ ДАННЫЕ

Данные по изотопным характеристикам <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr и <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd получены для 12 образцов кайнозойских базальтоидов северо-западного фланга Дархатской впадины (рис. 7; табл. 2). Изотопные отношения <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb и <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb определены для восьми образцов пород (табл. 3). Результаты изотопных исследований показывают, что, так же как и по петрогенным и

редким элементам, базальтоиды структуры делятся на две главные группы составов (рис. 7). Трахиандезит-базальты позднеолигоценового инициального этапа имеют несколько более высокие измеренные значения <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr и Pb в сравнении с базальтоидами позднемиоцен-раннеплиоценового заключительного этапа. Следует отметить, что изотопные характеристики Sr, Nd и Pb кайнозойских базальтоидов Дархатской впадины в полной мере соответствуют полю изотопной провинции Северной Монголии на юго-западном фланге БРЗ [Perepelov et al., 2020] и Удоканского плато на северо-восточном фланге БРЗ [Rasskazov et al., 2019]. Изотопные характеристики Sr, Nd и Pb базальтоидов Дархатской впадины демонстрируют значимое смещение значений изотопных отношений во времени в направлении от относительно обогащенной мантии к деплетированной мантии MORB типа или составам перидотитовых включений из вулканических пород Монголии (рис. 7).

**Таблица 2.** Изотопный состав Sr и Nd кайнозойских вулканических пород северо-западного фланга Дархатской впадины  
**Table 2.** Isotopic compositions of Sr and Nd in the Cenozoic volcanic rocks from the northwestern Darkhad depression

Образец	Порода	Возраст, млн лет	Rb	Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	2σ	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr(i)	Sm	Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	2σ	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd(i)	εNd(i)
BD-4442	ВТА	26.7	27	1226	0.704549	11	0.704525	8.7	38.6	0.512718	08	0.512694	1.77
BD-4432	ВТА	26.8	26	1209	0.704459	10	0.704435	9.1	41.1	0.512713	09	0.512690	1.68
BD-4716	ВТА	28.0	23	1219	*0.704510	10	0.704489	9.6	43.2	*0.512687	11	0.512663	1.18
BD-4710	ВТА	28.0	19	1379	*0.704780	10	0.704764	9.0	40.7	*0.512712	06	0.512688	1.67
BD-4405	HW	5.1	24	870	0.703983	12	0.703977	6.7	30.9	0.512769	14	0.512765	2.61
BD-4446	HW	5.8	25	825	0.704107	12	0.704100	6.5	29.3	0.512785	35	0.512780	2.91
D-12-42	BS	5.1	27	923	0.703851	11	0.703845	7.1	32.0	0.512829	09	0.512825	3.77
BD-4438	BS	5.1	26	949	0.703840	11	0.703834	7.1	31.9	0.512827	09	0.512823	3.73
BD-12-59	PT	5.7	31	924	*0.703920	20	0.703912	7.2	32.8	0.512774	08	0.512769	2.70
BD-4435	PT	5.8	32	972	0.703980	11	0.703972	7.1	33.3	0.512756	07	0.512751	2.35
BD-4407	TB	4.2	18	745	0.703855	13	0.703849	5.7	24.9	*0.512755	05	0.512751	2.31
D-12-22	TB	4.2	20	757	0.704026	16	0.704020	5.9	26.1	0.512762	11	0.512758	2.45

Примечание. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr и <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd – измеренные изотопные отношения; <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(i) и <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd(i) – изотопные отношения с коррекцией на возраст пород; εNd – рассчитано с использованием величин <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd=0.1967 и <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.512638 для современного хондритового резервуара (CHUR). Величины ошибок (2σ) относятся к последним полученным десятичным значениям изотопных отношений. Содержания Rb, Sr, Sm и Nd приведены в ppm. \* – изотопные отношения, измеренные в ЦКП Изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН, другие – в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

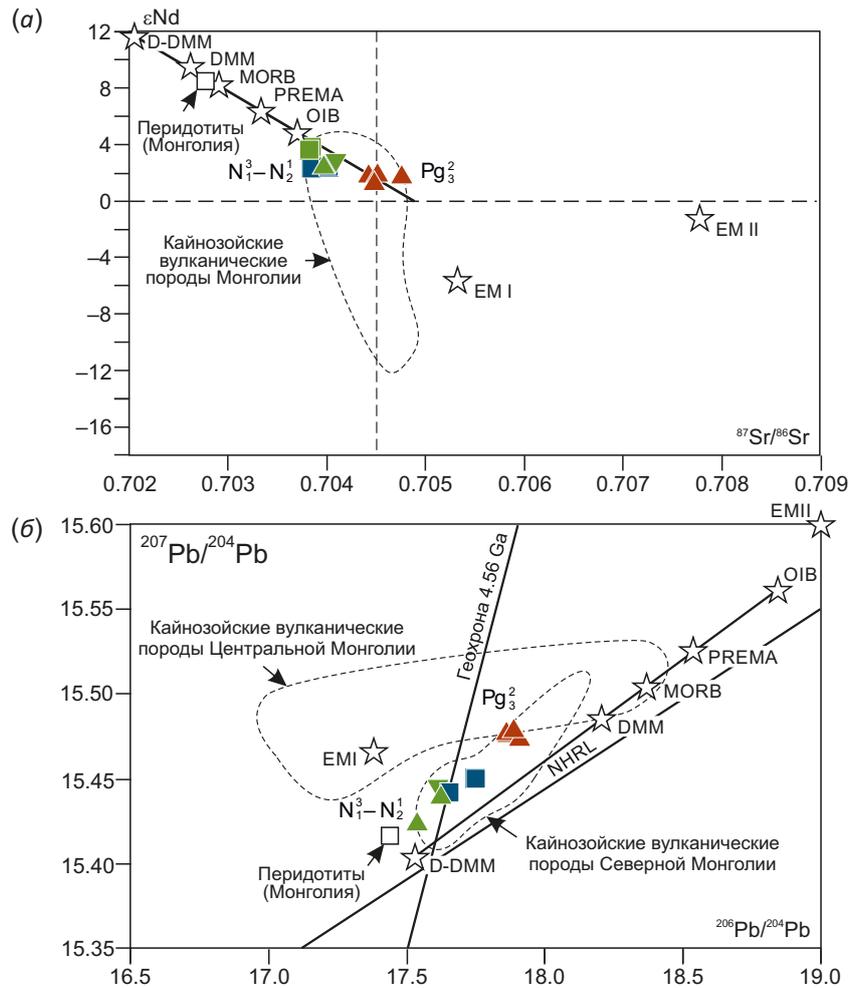
Note. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr and <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd are measured isotopic ratios; <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(i) and <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd(i) are age-corrected values; εNd values are calculated using <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd=0.1967 and <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.512638 for the present-day chondrite uniform reservoir (CHUR). All within-run errors of isotopic ratios (2σ) correspond to the updated decimals of the quoted values. The contents of Rb, Sr, Sm and Nd, are displayed in ppm. \* – are isotopic ratios measured at the Centre of Isotopic and Geochemical Research of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, other ratios are those measured at the Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust SB RAS.

**Таблица 3.** Изотопный состав Pb кайнозойских вулканических пород северо-западного фланга Дархатской впадины  
**Table 3.** Isotopic compositions of Pb in the Cenozoic volcanic rocks from the northwestern Darkhad depression

Образец	U	Th	Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	2σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	2σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	2σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb(i)	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb(i)	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb(i)
BD-4442	0.86	2.65	2.20	17.9649	16	15.4801	14	37.8994	33	17.8637	15.4754	37.7968
BD-4432	0.79	2.68	2.36	18.0366	16	15.5056	14	37.9376	37	17.9076	15.4728	37.8400
BD-4716	0.63	2.79	2.30	17.9626	20	15.4814	18	37.9417	46	17.8880	15.4779	37.8330
BD-4710	0.83	2.68	2.40	17.9604	17	15.4793	14	37.9114	36	17.8663	15.4749	37.8116
BD-4405	0.76	2.51	2.46	17.6307	15	15.4457	13	37.5391	34	17.9156	15.4450	37.5226
D-12-59	1.26	3.67	3.05	17.5658	16	15.4428	14	37.4844	36	17.5432	15.4238	37.4627
BD-4435	1.29	3.76	2.97	17.6467	17	15.4402	15	37.5744	39	17.6223	15.4391	37.5510
BD-4407	0.75	2.27	1.96	17.7653	18	15.4511	17	37.6407	40	17.7503	15.4504	37.6256
D-12-22	0.74	2.11	1.88	17.6691	17	15.4427	16	37.6305	38	17.6535	15.4420	37.6160

Примечание. <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb и <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb – измеренные значения изотопных отношений; <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb(i), <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb(i) и <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb(i) – изотопные отношения с коррекцией на возраст пород (см. табл. 2). Величины ошибок (2σ) относятся к последним полученным десятичным значениям изотопных отношений. Содержания U, Th и Pb приведены в ppm. Изотопные отношения Pb измерены в ЦКП Изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН. Измерение изотопного состава породного свинца проводилось с использованием метода двойного изотопного разбавления, а правильность полученных результатов оценивалась с помощью измерения стандартного образца NBS-981, нормированные изотопные отношения в котором равны: <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb – 36.7029±35; <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb – 15.4911±16; <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb – 16.9372±6 (2SD, n=22).

Note. <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb and <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb are measured isotopic ratios; <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb(i), <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb(i), <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb(i) are age-corrected values (see Table 2). All within-run errors of isotopic ratios (2σ) correspond to the updated decimals of the quoted values. The contents of U, Th and Pb are displayed in ppm. The Pb-isotopic ratios were obtained at the Centre of Isotopic and Geochemical Research of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS. The isotopic composition of ore lead was measured using a double isotope delution method, and the accuracy of the results obtained was estimated through measurement of NBS-981 reference standard whose isotopic ratios are: <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb – 36.7029±35; <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb – 15.4911±16; <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb – 16.9372±6 (2SD, n=22).



**Рис. 7.** Изотопный состав  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (а) и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (б) вулканических пород северо-западного фланга Дархатской впадины.

Поля изотопных составов кайнозойских вулканических пород Монголии (пунктирные контуры) приведены по [Perepelov et al., 2020]. Изотопные метки D-DMM, DMM, MORB, OIB приведены по [Iwamori, Nakamura, 2015], PREMA, EMI и EMI – по [Hart et al., 1992]. Метки средних изотопных составов перидотитовых включений Центральной Монголии приведены по [Carlson, Ionov, 2019]. Данные по изотопии Sr, Nd и Pb для вулканических пород северо-западного фланга Дархатской впадины см. в табл. 2, 3. Другие обозначения см. на рис. 4.

**Fig. 7.** Isotope compositions  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (a) and  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b) for volcanic rocks of the northwestern Darkhad depression.

Isotopic composition fields for the Cenozoic volcanic rocks of Mongolia (dotted outlines) are drawn after [Perepelov et al., 2020]. Isotope end-members D-DMM, DMM, MORB, OIB are displayed after [Iwamori, Nakamura, 2015], and PREMA, EMI and EMI – after [Hart et al., 1992]. The average for peridotite xenoliths of Central Mongolia is displayed after [Carlson, Ionov, 2019]. For Sr, Nd and Pb isotopic data on the volcanic rocks in the northwestern Darkhad depression see Tables 2 and 3. Other symbols are the same as in Fig. 4.

**7. ОБСУЖДЕНИЕ**

Моделирование процессов плавления пироксенитов и перидотитов в системе La/Yb – Sm/Yb показало, что трахиандезибазальтовые расплавы инициального этапа могли быть сформированы при ~7–8%-ном плавлении эклогитового вещества или ~10–11%-ном – Grt-содержащих пироксенитов, а трахибазальтовые расплавы могут быть образованы при ~2–3%-ном плавлении Grt-содержащих перидотитов (рис. 8, а). Присутствие значительного объема реститового граната в источнике трахиандезибазальтовых магм инициального этапа может быть подтверждено особенностями распределения в породах редких элементов. К ним

относится высокая степень фракционирования в трахиандезибазальтах REE, а также сравнительно низкие содержания в них Sc и в меньшей степени Y.

Другим вещественным доказательством участия в образовании трахиандезибазальтовых магм инициального этапа Grt-содержащего пироксенитового или эклогитового вещества служат построения в системе Mg# – Fe/Mn по [Le Roux et al., 2010], модифицированной авторами (рис. 8, б).

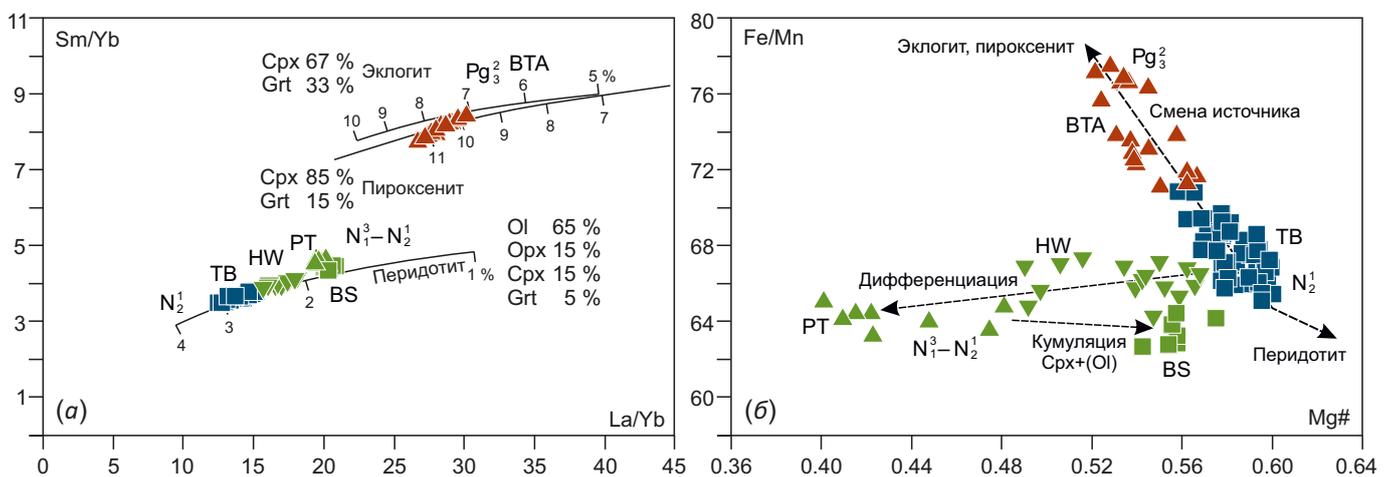
Составы трахибазальтов заключительного этапа и трахиандезибазальтов инициального этапа в координатах Mg# – Fe/Mn (рис. 8, б) образуют единый тренд с отчетливым разделением этих базальтоидов на группы

и последовательным увеличением значений Fe/Mn в направлении умеренного снижения магнезиальности. Согласно работе [Le Roux et al., 2010] такой тренд не может быть объяснен реализацией процессов дифференциации магм с участием Ol как главного минерала вкрапленника этих пород. Коэффициенты распределения Fe и Mn системе «Ol/расплав» по экспериментальным данным в условиях высоких температур отвечают величинам  $1.28 \pm 0.26$  и  $1.06 \pm 0.05$  соответственно, поэтому фракционирование оливина может оказывать лишь слабое влияние на эволюцию составов пород в координатах Mg#–Fe/Mn и не объясняет формирование общего тренда для трахибазальтов и трахиандезибазальтов. При этом известно, что базальтовые эклогиты эксгумированных офиолитовых комплексов имеют высокие значения Fe/Mn отношений (~100) и умеренную магнезиальность (Mg#~0.40) [Dale et al., 2009]. Эти значения ложатся на продолжение тренда эволюции составов трахиандезибазальтов инициального этапа вулканической активности Дархатской впадины в направлении возрастания величин Fe/Mn отношений (рис. 8, б). С другой стороны, перидотиты литосферной мантии Монголии имеют в среднем относительно низкие величины отношений Fe/Mn (~60) и высокую магнезиальность (Mg#~0.9) [Carlson, Ionov, 2019], образуя область составов в продолжение тренда трахибазальтов заключительного этапа в направлении уменьшения значений Fe/Mn отношений. Вместе с тем серия пород позднемиоцен-раннеплиоценовых щитовых вулканических построек демонстрирует

эволюцию составов с заметным снижением значений Mg# и Fe/Mn в направлении от гавайитов к фонотефритам. Эта закономерность может быть объяснена дифференциацией составов гавайитовых магм с участием Pl, Crx и Ol, вкрапленники которых характерны для этой группы пород.

Особенности распределения величин Fe/Mn в зависимости от магнезиальности базальтоидов (рис. 8) позволяют считать первичными недифференцированными или слабо дифференцированными типами магм трахиандезибазальтовые расплавы инициального этапа, а также трахибазальтовые расплавы заключительного этапа, тогда как серия пород щитовых построек может являться примером глубокой дифференциации гавайитовых магм или последовательного уменьшения степени плавления источника вещества.

Снижение значений FeO/Mn от трахиандезибазальтов инициальной стадии к трахибазальтам заключительной стадии, а также установленные закономерности вариаций редкоэлементного и изотопного состава Sr, Nd и Pb для этих групп пород могут свидетельствовать о смене источников вещества в направлении от существенно метасоматизированной мантии с присутствием Grt-содержащего пироксенитового или эклогитового компонента к слабо метасоматизированной перидотитовой мантии MORB типа. Возможность участия эклогитового компонента в формировании кайнозойских щелочно-базальтовых магм Северной Монголии отмечалась ранее в работах [Perepelov et al., 2017, 2020].



**Рис. 8.** Результаты микроэлементного моделирования условий формирования кайнозойских щелочно-базальтовых магм северо-западного фланга Дархатской впадины (а) и распределение составов пород на графике Mg# – Fe/Mn (б). (а): сплошные линии – вариации степени плавления (%). Минеральный состав модельных источников (%). Коэффициенты распределения «минерал/расплав» и содержания La, Sm и Yb в эклогитах MORB типа, Grt-содержащих пироксенитах и перидотитах приведены по [Perepelov et al., 2020]; (б): Mg#=Mg/(Mg+FeO<sub>total</sub>) (мол. %) – коэффициент магнезиальности пород. Содержания Fe и Mn в ppm. Другие обозначения см. на рис. 4, 5.

**Fig. 8.** Trace element modeling for the formation conditions of the Cenozoic alkaline basaltic magmas of the northwestern Darkhad (а) and rock compositions in Mg# – Fe/Mn diagram (б). (а): solid curves are variations of the degree of melting (%). Mineral compositions of the modelled sources (%). Mineral/melt distribution coefficients and La, Sm and Yb concentrations in MORB-type eclogites, Grt-bearing pyroxenites and peridotites are presented after [Perepelov et al., 2020]; (б): Mg#=Mg/(Mg+FeO<sub>total</sub>) (mol. %) is a magnesium coefficient. Fe and Mn contents are displayed in ppm. Other symbols are the same as in Fig. 4, 5.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность полученных геохронологических и изотопно-геохимических данных по кайнозойскому вулканизму северо-западного фланга Дархатской впадины дает возможность представить примерную модель его развития. Формирование трахиандезибазальных расплавов на инициальном позднеолигоценном этапе могло происходить на предрифтовой стадии развития территории с вовлечением в область магмообразования вещества метасоматизированной мантии с участием Grt-содержащего пироксенитового или эклогитового компонента. Развитие вулканических процессов на этом этапе могло быть связано с подъемом вещества из астеносферной мантии. В дальнейшем, примерно через 20 млн лет относительного покоя и с началом рифтогенной стадии развития Дархатской структуры, вулканическая активность здесь возобновляется. Этот заключительный этап связан с проявлениями вначале гавайитовых, а затем с возрастанием степени плавления и трахибазальтовых магм, образованных в результате декомпрессионного плавления Grt-содержащих перидотитов в области слабо метасоматизированной литосферной мантии.

## 9. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.М. Саватенкову (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН) и анонимному автору за рецензии статьи, в которых содержалась конструктивная критика и важные замечания, позволившие улучшить содержание работы.

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

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

## 11. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 12. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Carlson R.W., Ionov D.A., 2019. Compositional Characteristics of the MORB Mantle and Bulk Silicate Earth Based on Spinel Peridotites from the Tariat Region, Mongolia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 257, 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.05.010>.

Dale C.W., Burton K.W., Pearson D.G., Gannoun A., Alard O., Argles T.W., Parkinson I.J., 2009. Highly Siderophile Element Behaviour Accompanying Subduction of Oceanic Crust: Whole Rock and Mineral-Scale Insights from a High-Pressure Terrain. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73 (5), 1394–1416. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.036>.

Demonterova E.I., Ivanov A.V., Rasskazov S.V., Markova M.E., Yasnygina T.A., Malykh Y.M., 2007. Lithospheric Control on Late Cenozoic Magmatism at the Boundary of the Tuva-Mongolian Massif, Khubsugul Area, Northern Mongolia. *Petrology* 15, 90–107. <https://doi.org/10.1134/S0869591107010055>.

Hart S.R., Hauri E.H., Oschmann L.A., Whitehead J.A., 1992. Mantle Plumes and Entrapment: Isotopic Evidence. *Science* 256 (5056), 517–520. <https://doi.org/10.1126/science.256.5056.517>.

Ivanov A.V., Demonterova E.I., He H., Perepelov A.B., Travin A.V., Lebedev V.A., 2015. Volcanism in the Baikal Rift: 40 years of Active-versus-Passive Model Discussion. *Earth-Science Reviews* 148, 18–43. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.011>.

Iwamori H., Nakamura H., 2015. Isotopic Heterogeneity of Oceanic, Arc and Continental Basalts and Its Implications for Mantle Dynamics. *Gondwana Research* 27 (3), 1131–1152. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.003>.

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

Le Roux V., Lee C.-T.A., Turner S.J., 2010. Zn/Fe Systematics in Mafic and Ultramafic Systems: Implications for Detecting Major Element Heterogeneities in the Earth's Mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74 (9), 2779–2796. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.02.004>.

Logachev N.A., 2003. History and Geodynamic of the Baikal Rift. *Russian Geology and Geophysics* 44 (5), 391–406.

McDonough W.F., Sun S.-S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120 (3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).

Perepelov A.B., Kuzmin M.I., Tsypukova S.S., Demonterova E.I., Ivanov A.V., Shcherbakov Y.D., Puzankov M.Y., Odgerel D., Bat-Ulzi D., 2017. Eclogite Trace in Evolution of Late Cenozoic Alkaline Basalt Volcanism on the Southwestern Flank of the Baikal Rift Zone: Geochemical Features and Geodynamic Consequences. *Doklady Earth Sciences* 476, 1187–1192. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1710018X>.

Perepelov A., Kuzmin M., Tsypukova S., Shcherbakov Y., Dril S., Didenko A., Dalai-Erdene E., Puzankov M., Zhgilev A., 2020. Late Cenozoic Uguumur and Bod-Uul Volcanic Centers in Northern Mongolia: Mineralogy, Geochemistry, and Magma Sources. *Minerals* 10 (7), 612. <https://doi.org/10.3390/min10070612>.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Sun Y., Saranina E.V., 2019. General Pb-Isotope Systematics of Sources for Volcanic Rocks of the Latest Geodynamic Stage in Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (2), 507–539 (in Russian) [Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Сунь Й., Саранина Е.В. Генеральная Pb-изотопная систематика источников вулканических пород новейшего геодинамического этапа Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 2. С. 507–539]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0424>.

Rasskazov S.V., Saranina E.V., Demonterova E.I., Maslovskaya M.N., Ivanov A.V., 2002. Mantle Components in Late Cenozoic Volcanics of the East Sayan (from Pb, Sr, and Nd Isotopes). *Russian Geology and Geophysics* 43 (12), 1065–1079.

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

Tsypukova S.S., Perepelov A.B., Demonterova E.I., Pavlova L.A., Travin A.V., Puzankov M.Y., 2014. Origin and Evolution of Neogene Alkali-Basaltic Magmas in the Southwestern

F flank of the Baikal Rift System (Heven Lava Plateau, Northern Mongolia). *Russian Geology and Geophysics* 55 (2), 190–215. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.006>.

Yarmolyuk V.V., Ivanov V.G., Kovalenko V.I., Pokrovskii B.G., 2003. Magmatism and Geodynamics of the Southern Baikal Volcanic Region (Mantle Hot Spot): Results of Geochronological, Geochemical, and Isotopic (Sr, Nd, and O) Investigations. *Petrology* 11 (1), 1–30.

Zorin Y.A., Turutanov E.K., Mordvinova V.V., Kozhevnikov V.M., Yanovskaya T.B., Treussov A.V., 2003. The Baikal Rift Zone: The Effect of Mantle Plumes on Older Structure. *Tectonophysics* 371 (1–4), 153–173. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00214-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00214-2).