

## ВУЛКАНИЗМ РАННЕЙ СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТРОВА ИТУРУП (КУРИЛЬСКАЯ ОСТРОВНАЯ ДУГА)

©2021 П.И. Федоров<sup>1</sup>, Н.В. Цуканов<sup>2</sup>, А.Р. Гептнер<sup>1</sup>, В.В. Петрова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: pi\_fedorov@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, 117997;  
e-mail: kambear2011@yandex.ru

Представлены новые петрогеохимические данные по среднемиоцен-раннеплиоценовым вулканическим породам центральной части о. Итуруп. Показано, вулканизм среднемиоцен-раннеплиоценового возраста в центральной части о. Итуруп происходил в надсубдукционной обстановке. Распределение высокозарядных некогерентных элементов (HFSE) в базальтоидах свидетельствует об их формировании при частичном плавлении истощенной верхней мантии, тогда как обогащение пород крупноионными литофильными элементами (LILE) свидетельствует как о флюидной мантийной добавке, привнесенной в расплавы в ходе эволюции первичной магмы, так и об участии низкотемпературного надсубдукционного флюида. Установленные различия состава базальтоидов фронтальной и тыловой зон из-за ограниченного количества проанализированных образцов рассматриваются как предварительные. Так, базальтоиды тыловой зоны отличаются более высокими концентрациями Th, Pb, HFSE (Nb, Zr, Y, Hf), относительным обогащением LREE, выраженными негативными Zr- и Hf-аномалиями, и положительной Eu.

*Ключевые слова:* вулканизм, геохимия, неоген, Курильская островная дуга, остров Итуруп.

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большой интерес, проявляемый к островодужным системам и связанными с ними магматическими процессами, вопросы зарождения и эволюции островодужных магм остаются во многом дискуссионными. В определенной мере это связано со слабой петрологической изученностью вулканических пород, образовавшихся на ранних этапах формирования дуги, часто расположенных ниже уровня моря. Так, в пределах Изу-Бонинской и Марианской островных дуг исследования нижних частей вулканического разреза проводились с помощью обитаемых подводных аппаратов (Ishizuka, 2006; Stern, 2004).

Информация о вещественном составе неогеновых вулканитов, картируемых в основании наземной части вулканического разреза Курильской островной дуги, носит ограниченный характер (Пискунов, 1987; Фролова и др., 1985). Первые исследования изотопно-геохимического состава неогеновых вулканитов, выполненные на современном аналитическом уровне, касаются лишь южного острова Курильской островной

дуги — Кунашира (Мартынов, 2013; Мартынов и др., 2015; Martynov et al., 2010). Цитируемыми авторами было показано, что миоценовые лавы фронтальной зоны острова отличаются аномально низкими концентрациями калия и принадлежат толеитовой серии, тогда как базальты тыловой зоны, обогащенные  $K_2O$ , относятся к известково-щелочной серии. Кроме повышенной калиевоности миоценовые лавы тыловой зоны отличаются значительные вариации содержания  $MgO$ , вплоть до появления высокомагнезиальных разновидностей. Геохимическая зональность миоценовых вулканитов отчетливо выражена и по другим элементам. Лавы тыловой зоны характеризуются повышенными концентрациями Ni, Cr, V, REE, LILE (Rb, Ba, Sr) и HFSE (Nb, Ta, Hf), относительным обогащением LREE, слабо выраженными негативными Eu- и Hf-аномалиями. Породы вулканического фронта напротив, резко деплетированы в отношении легких лантаноидов и характеризуются слабо выраженной положительной Eu-аномалией при отсутствии минимума гафния.

Плиоценовые тыловодужные вулканиты о. Кунашир чаще принадлежат известково-

щелочной серии, тогда как их фронтальные аналоги располагаются в полях как известково-щелочной, так и толеитовой серий. Концентрация MgO в тыловодужных лавах достигает 9%, не превышая 6% в породах фронтальной зоны. Тыловодужные породы также характеризуются более низкими содержаниями FeO\*, Na<sub>2</sub>O, но высокими — TiO<sub>2</sub> и ряда редких элементов: Ba, Sr, Nb, Th, Ta, Zr. Для обогащенных легкими лантаноидами тыловодужных лав отчетливо выражены негативные Hf- и Eu-аномалии.

Распределение главных и редких элементов позволило предположить важную роль физической природы субдукционного компонента (расплав или флюид) в поперечных вариациях геохимических характеристик разновозрастных вулканитов о. Кунашир (Мартынов, 2013; Мартынов и др., 2015; Martynov et al., 2010). Для лав вулканического фронта это преимущественно флюидная фаза, образованная в результате дегидратации измененной океанической коры и субдукционного осадка в пропорции ~95 % и — 5% соответственно. В магмогенезисе тыловодужных базальтов наряду с флюидной фазой принимал участие расплав, образованный в результате плавления осадочного материала (до ~5 %).

Что касается неогенового вулканизма о. Итуруп, то материалы по химическому составу лав практически отсутствуют. Полученные нами данные о составе неогеновых вулканитов центральной части о. Итуруп, охватывающие фронтальную и тыловую зоны, в определенной мере помогут восполнить этот пробел. Задача данной публикации — анализ геохимических данных по среднемиоцен-раннеплиоценовым вулканическим породам о. Итуруп, отражающим раннюю стадию развития острова, позволивший провести их геохимическую типизацию, проследить изменение состава пород фронтальной и тыловой зон, оценить различную роль в магмогенезисе субдукционных компонентов.

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

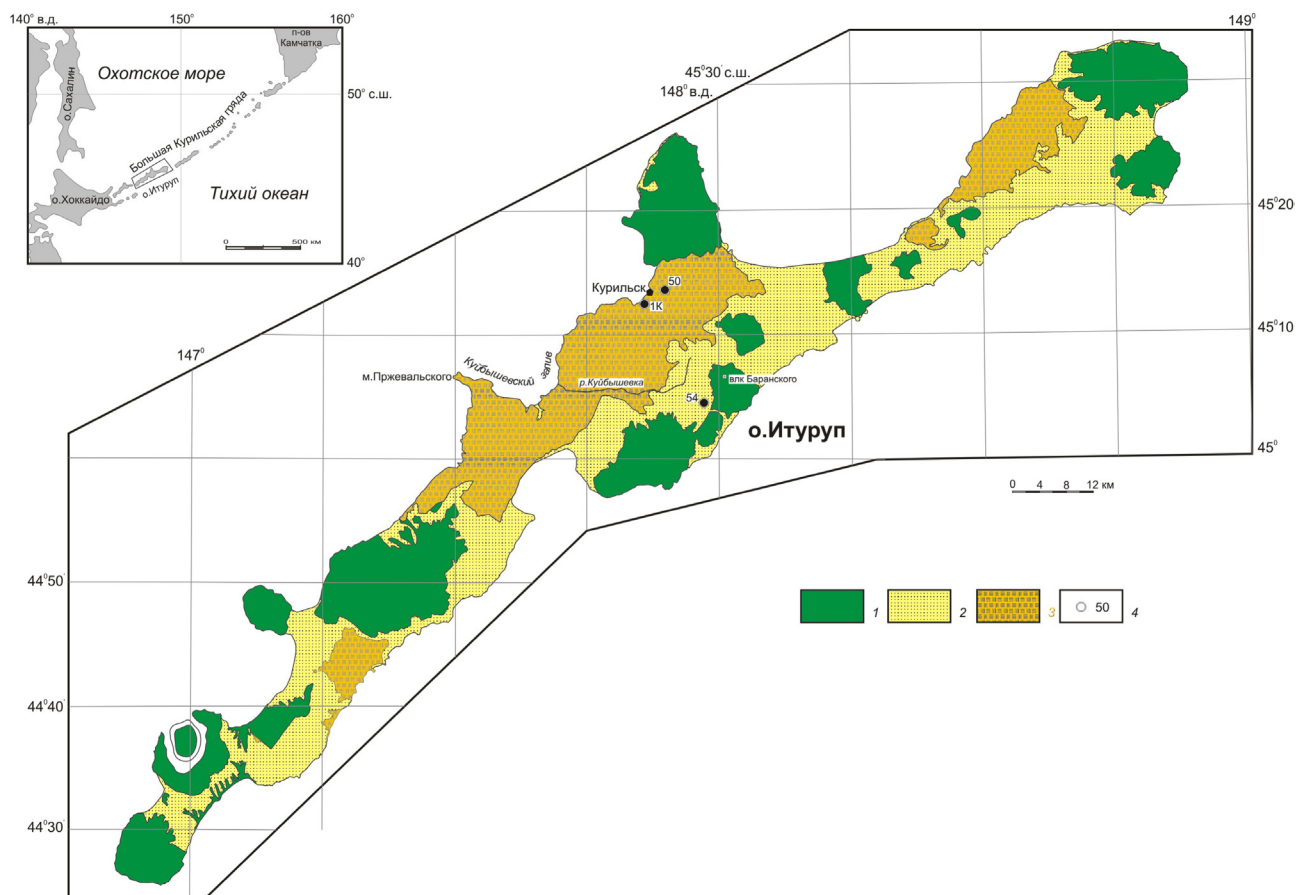
Курильская островная дуга располагается в северо-западной части Тихого океана. Ее формирование рассматривается как результат субдукции под континентальную окраину сравнительно древней (90–118 млн лет; 8.6 см/год) и холодной Тихоокеанской плиты, следы которой сейсмологическими методами прослеживаются до глубины 650 км (Атлас..., 2009; Геолого-геофизический..., 1987).

Начало вулканизма в Курильской островной дуге относят к раннему миоцену или олигоцену (Пискунов, 1987). Однако, наиболее древние вулканогенно-осадочные породы наземной

части вулканического разреза, формирование которых происходило в подводных условиях, отвечают среднему миоцену-раннему плиоцену (Витухин и др., 1996).

Для о. Итуруп (рис. 1), наиболее крупного (3174.71 км<sup>2</sup>) из островов в составе Большой Курильской гряды, характерно широкое распространение пород неогенового возраста (Горшков, 1967). Наиболее древние вулканиты, объединяемые Б.Н. Пискуновым (1987) в зеленотуфовую формацию (тебеньковская и куйбышевская свиты), представлены вулканическими брекчиями, конгломератами, брекчиями, пропилитизированными лавами и туфами основного, среднего и кислого составов. Выше лежащие отложения рыбаковской, камуйской и парусной свит, представлены осадочными и туфогенно-осадочными породами, туфами андезитов, дацитов, брекчиями, шаровыми лавами основного состава. Стратиграфические соотношения выделяемых свит не всегда хорошо выражены, так как они имеют близкий литологический состав, а содержащиеся в них комплексы фауны и микрофауны бедны и не всегда позволяют датировать выделенные толщи.

Обобщенный разрез неогеновых вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород центральной части о. Итуруп приведен Д.И. Витухиным с соавторами (1996) по материалам изучения кернов скважин, а так же коренных выходов пород Охотского побережья в р-не г. Курильска, Куйбышевского залива, мыса Пржевальского, р. Куйбышевска. Цитируемыми авторами показано, что по степени литификации разрез разделяется на два подкомплекса (рис. 2): нижний, представленный хорошо литифицированными вулканогенными и туфогенно-осадочными породами, местами интенсивно гидротермально измененными; и верхний, сложенный преимущественно слаболитифицированными туфогенно-осадочными породами. Основание разреза на острове не обнажается. Нижний подкомплекс (мощностью не менее 600 м) в скважинах представлен в нижней части туфоалевролитами и мелкозернистыми песчаниками, которые вверх сменяются грубыми туфобрекчиями, туфами, туфогравелитами, часто пропилитизированными, с телами андезитов — чаще всего массивных, реже крупноглыбовых и сравнительно маломощными прослоями туфоалевролитов и туфопесчаников. Вверх по разрезу они наращиваются светло-серыми, желтовато-серыми, выбеливающимися слоистыми туфоалевролитами, алевролитами, туфопесчаниками, туфогравелитами с прослоями грубообломочных туфобрекчий, плавающей галькой, обломками основных и средних эффузивов, редкими прослоями туфодиатомитов. В песчаниках содержатся остатки моллюсков. В верхней части



**Рис. 1.** Схема геологического строения о. Итуруп, по (Ковтунович и др., 2002, с упрощением): 1 — четвертичные-современные вулканические постройки; 2 — позднеплиоцен-четвертичные вулканогенно-осадочные и терригенные отложения; 3 — среднемиоцен-плиоценовые вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования; 4 — место положение и номер и скважины. На врезке — расположение о. Итуруп на географической схеме Охотоморского региона.

**Fig. 1.** Schematic geological map of Iturup Island (by Kovtunovich et al., 2002, simplified): 1 — Quaternary-modern volcanic edifices; 2 — Late Pliocene-Quaternary volcanic-sedimentary and terrigenous deposits; 3 — Middle Miocene-Pliocene volcanic and volcanic-sedimentary complexes; 4 — location and drill hole number. The inset shows the location of Iturup Island in the Okhotsk region.

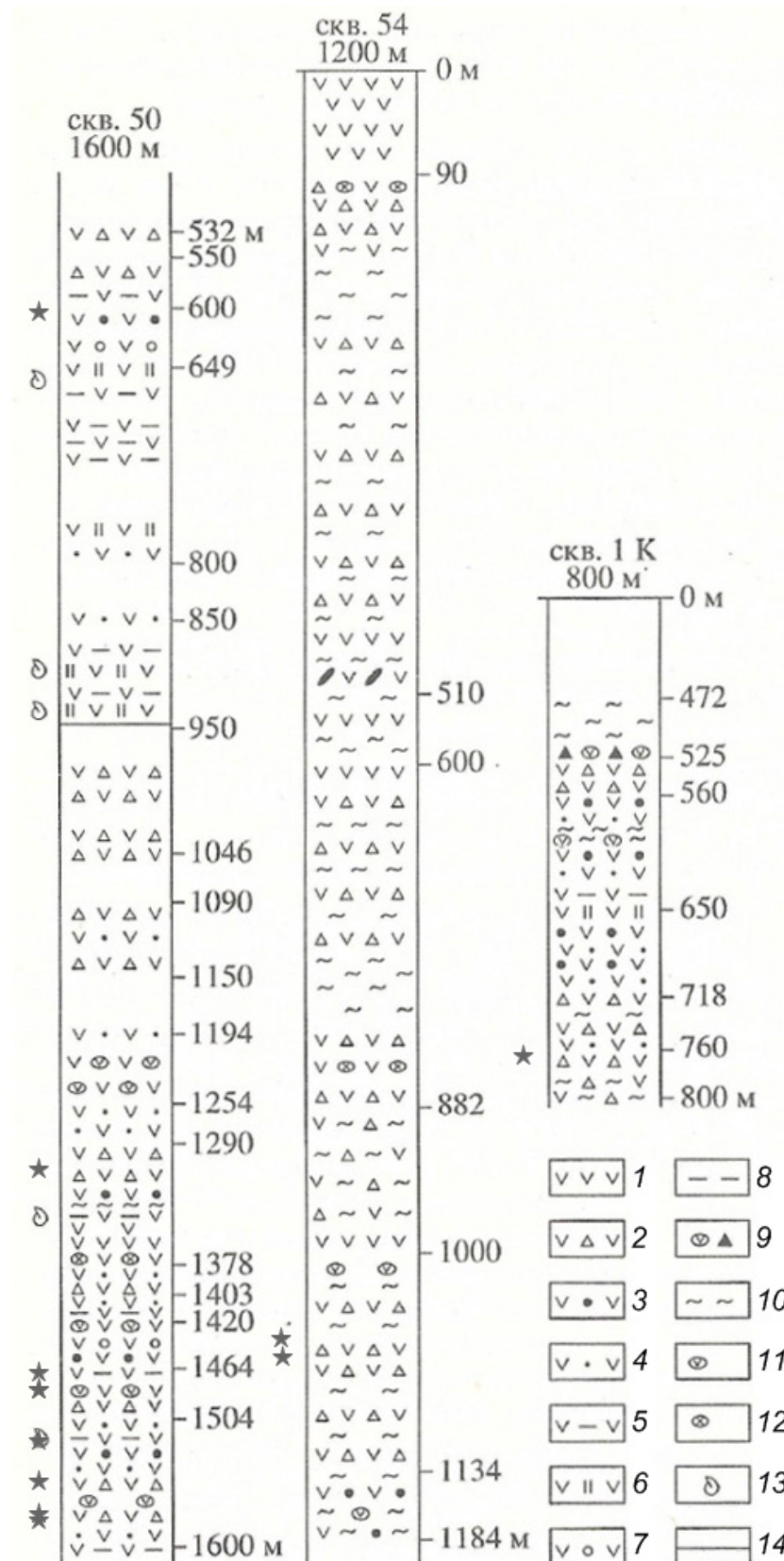
разреза наблюдаются грубые туфоконгломератобреккии и глыбовые бреккии с хаотической структурой, которые переслаиваются с неясно-слоистыми туфопесчаниками и туфо-конгломератами. В обломочной части преобладают породы основного и среднего составов, но встречаются и кислые разности. Присутствует большое количество лав андезитов и базальтов. Верхний подкомплекс сложен слаболитифицированными, часто рыхлыми туфогенно-осадочными отложениями, представленными туфоалевролитами, туфоаргиллитами, песками, которые содержат глыбы эффузивов среднего и кислого составов. Возрастной интервал отложений и проявления вулканизма — средний миоцен — ранний плиоцен (Витухин и др., 1996).

В настоящей работе были изучены наименее измененные вулканы из скважин № 50, 1К (р-н г. Курильска, тыловая зона островной дуги) и 54 (р-н вулкана Баранского, фронтальная зона).

## ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД

Химический состав вулканических пород был выполнен в Лаборатории химико-аналитических исследований Геологического института РАН (Москва) под руководством С.М. Ляпунова. Петрогенные элементы были определены методом РФА на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 Pioneer (аналитики Б.В. Ермолаев и М.В. Рудченко). Определение п.п.п. проводилось весовым методом. Концентрации микроэлементов были исследованы методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе ICP-6500 (аналитик О.И. Окина) по методике (Fedyunina et al., 2012).

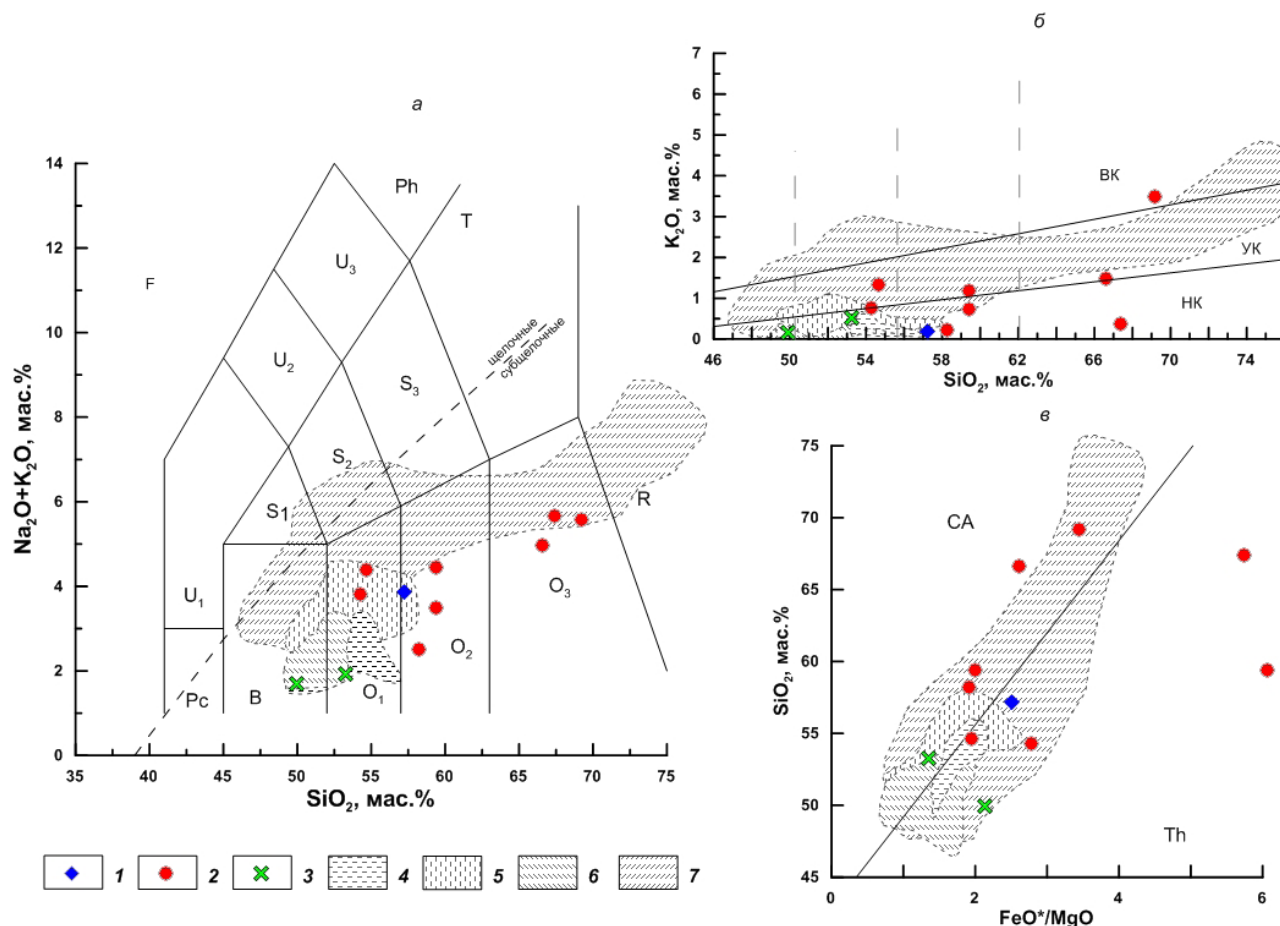
Состав вулканических пород центральной части о. Итуруп приведен в таблице и на рис. 3–7. На этих рисунках также представлен сравнительный материал по неогеновым вулканитам



**Рис. 2.** Разрезы кайнозойских толщ о. Итуруп, по (Витухин и др., 1996): 1 — эффузивы; 2 — туфобрекчии; 3 — туфогравелиты; 4 — туфопесчаники; 5 — туфоалевролиты; 6 — туфодиатомиты; 7 — туфоконгломераты; 8 — алевролиты; 9 — лавобрекчии; 10 — гидротермальноизмененные породы; 11, 12 — обломки основных и средних вулканитов (11), кислых магматических пород (12); 13 — места отбора проб на микропалеонтологический анализ; 14 — граница верхнего и нижнего подкомплексов. Звездочками обозначены места отбора проб на химический анализ.

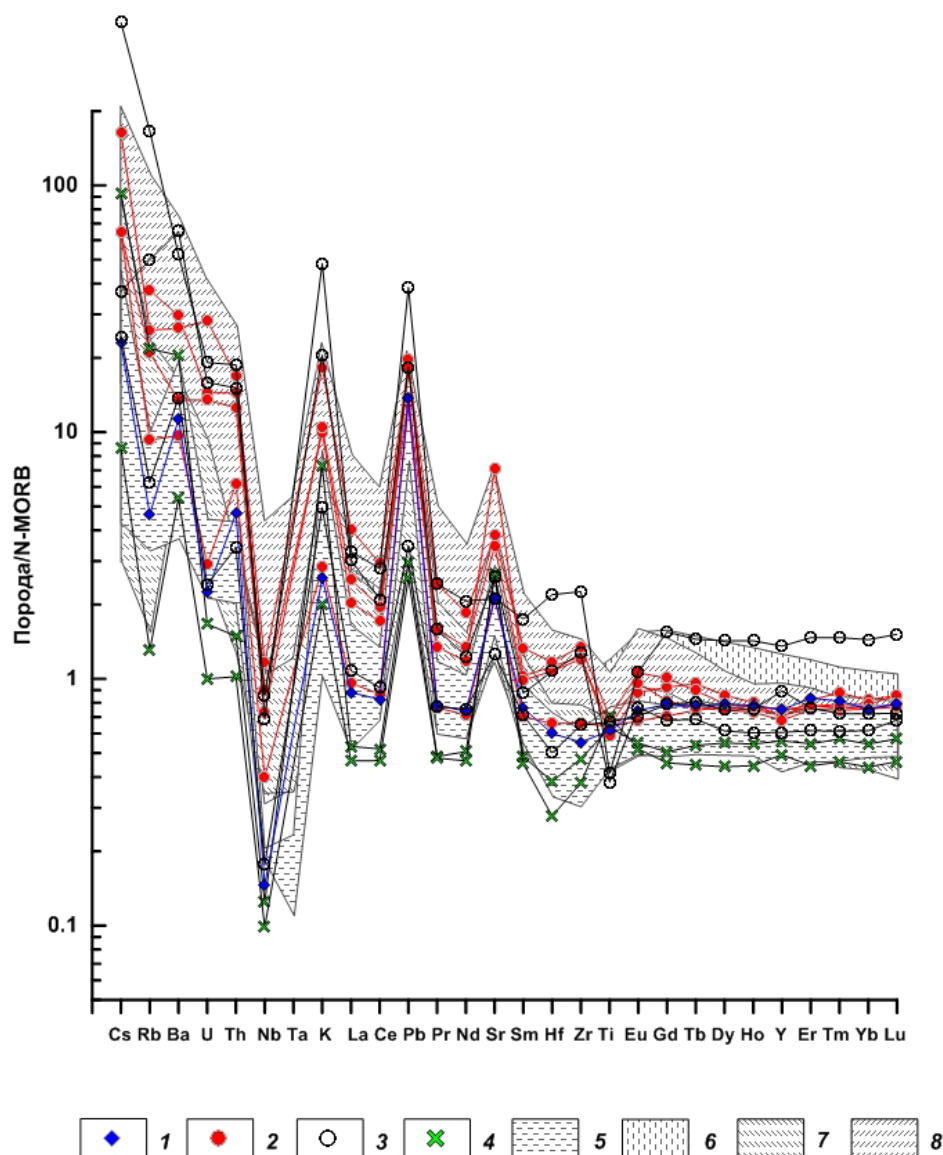


**Fig. 2.** Sections of the Cenozoic strata in Iturup Island (by Vitukhin et al., 1996): 1 — effusives; 2 — tuff breccia; 3 — tuff gravelite; 4 — tuff sandstones; 5 — tuff siltstones; 6 — tuff diatomites; 7 — tuff conglomerates; 8 — siltstones; 9 — lavobreccia; 10 — hydrothermally altered rocks; 11, 12 — fragments of basic and medium volcanic rocks (11), debris of acidic igneous rocks (12); 13 — sampling sites for micropaleontological analysis; 14 — upper and lower subcomplex boundary. The asterisks indicate the locations of sampling for chemical analysis.



**Рис. 3.** Вариации петрогенных элементов в среднемиоцен-раннеплиоценовых вулканических породах о. Итуруп: 1–3 — скважины: 1 — 1К; 2 — 50; 3 — 54; 4–5 — о. Кунашир, средний миоцен-плиоцен (Мартынов, 2013; Мартынов и др., 2015; Martynov et al., 2010); 4 — фронтальная зона; 5 — тыловая зона; 6–7 — дуга Северо-Восточной Японии (Ikeda, 1998; Okamura et al., 2016; Shuto et al., 2006, 2013, 2015; Takanashi et al., 2011): средний миоцен-плиоцен: 6 — фронтальная зона; 7 — тыловая зона. Диаграмма TAS (Le Bas et al., 1986) (a): F — фойдиты; Pc — пикробазальты; B — базальты; O<sub>1</sub> — андезитобазальты; O<sub>2</sub> — андезиты; O<sub>3</sub> — дациты; R — риолиты; S<sub>1</sub> — трахибазальты; S<sub>2</sub> — трахиандезитобазальты; S<sub>3</sub> — трахиандезиты; T — трахиты и трахидациты; U<sub>1</sub> — базаниты и тефриты; U<sub>2</sub> — фонотефриты; U<sub>3</sub> — тефрифонолиты; Ph — фонолиты. Линия раздела субщелочных и щелочных пород по (Irvine, Baragar, 1971). K<sub>2</sub>O — SiO<sub>2</sub> (б): вулканические серии (Peccherillo, Taylor, 1976) — HK — низкокалиевая, YK — умереннокалиевая известково-щелочная, BK — высококалиевая известково-щелочная. Диаграмма SiO<sub>2</sub>–FeO\*/MgO (в): линия раздела пород толеитовой (Th) и известково-щелочной (CA) серий по (Miyashiro, 1974).

**Fig. 3.** Variations in concentrations of major elements in Middle Miocene-Pliocene volcanic rocks from Iturup Island: 1–3 — drill holes: 1 — 1K; 2 — 50; 3 — 54; 4–5 — Kunashir Island, Middle Miocene-Pliocene (Martynov, 2013; Martynov et al., 2010; 2015); 4 — volcanic front, 5 — back arc; 6–7 — Northeast Japan arc, Middle Miocene-Pliocene (Ikeda, 1998; Okamura et al., 2016; Shuto et al., 2006, 2013, 2015; Takanashi et al., 2011): 6 — volcanic front; 7 — back arc. a — TAS diagram (Le Bas et al., 1986). F — foidites; Pc — picrobasalts; B — basalts; O<sub>1</sub> — andesibasalts; O<sub>2</sub> — andesites; O<sub>3</sub> — dacites; R — rhyolites; S<sub>1</sub> — trachybasalts; S<sub>2</sub> — trachyandesibasalts; S<sub>3</sub> — trachyandesites; T — trachytes and trachydacites; U<sub>1</sub> — basanites and tephrites; U<sub>2</sub> — fonotephrites; U<sub>3</sub> — terrhiphonolites; Ph — phonolites. Boundary line between alkaline and subalkaline rocks, after Irvine, Baragar, 1971; б — K<sub>2</sub>O — SiO<sub>2</sub>. Volcanic series (Peccherillo, Taylor, 1976): (HK) low-potassium; (YK) moderate-potassium calc-alkaline; (BK) high-potassium calc-alkaline; в — SiO<sub>2</sub>–FeO\*/MgO diagram. Boundary line between rocks of tholeiitic (Th) and calc-alkali (CA) series, after Miyashiro, 1974.



**Рис. 4.** Распределение несовместимых элементов в среднемиоцен-раннеплиоценовых вулканических породах о. Итуруп: 1–4 — скважины: 1 — 1К; 2–3 — 50: 2 — базальты и андезибазальты; 3 — дациты; 4 — 54; 5–6 — о. Кунашир, средний миоцен-плиоцен (Мартынов, 2013; Мартынов и др., 2015; Martynov et al., 2010): 5 — фронтальная зона; 6 — тыловая зона; 7–8 — дуга северо-восточной Японии (Ikeda, 1998; Okamura et al., 2016; Shuto et al., 2006, 2013, 2015; Takanashi et al., 2011): средний миоцен-плиоцен: 7 — фронтальная зона; 8 — тыловая зона.

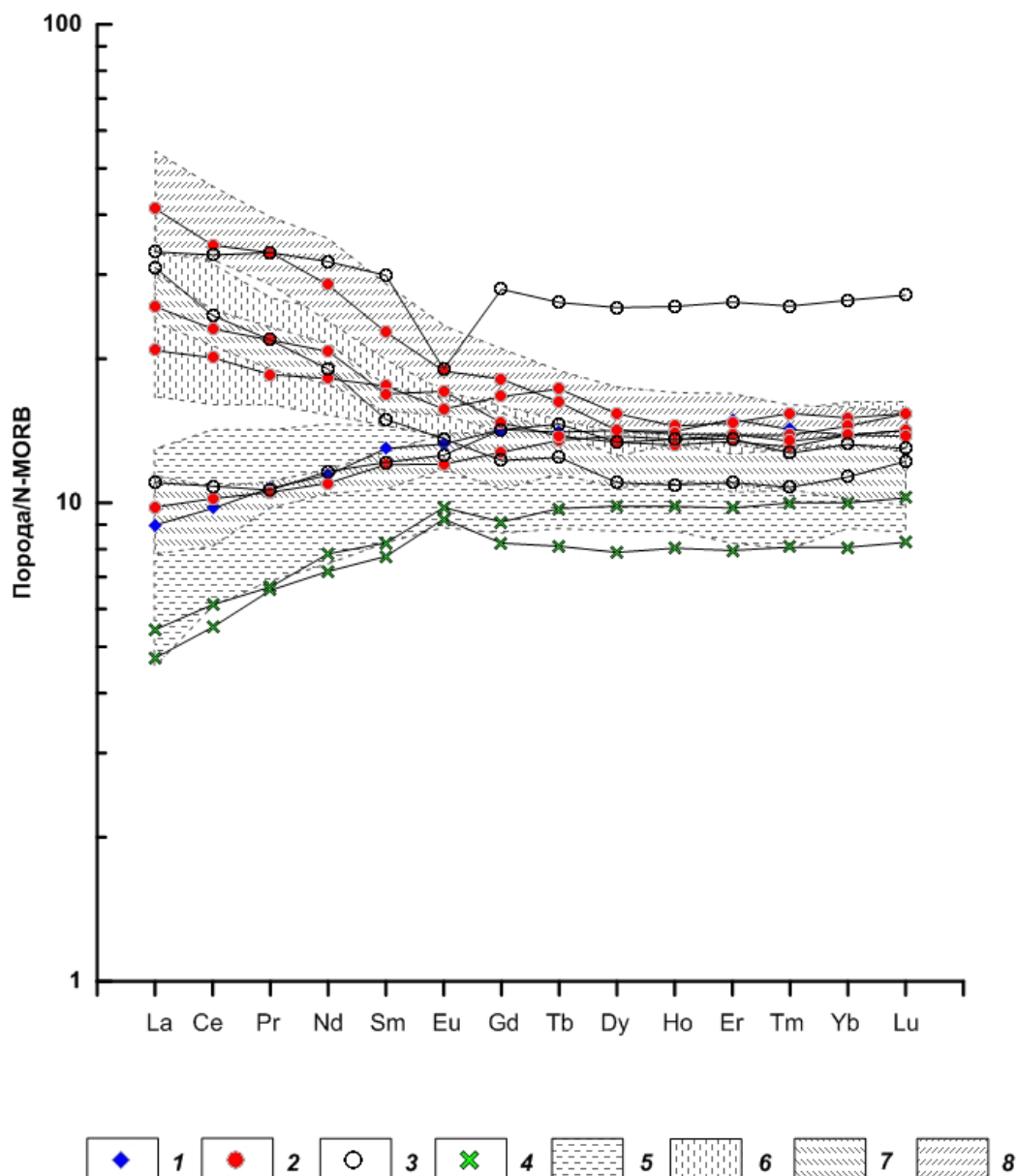
**Fig. 4.** Distribution plot of trace elements in Middle Miocene-Pliocene volcanic rocks from Iturup Island: 1–4 — drill holes: 1 — 1K; 2–3 — 50: 2 — basalts and andesibasalts; 3 — dacites; 4 — 54; 5–6 — Kunashir Island, Middle Miocene-Pliocene (Martynov, 2013; Martynov et al., 2010; 2015): 5 — volcanic front; 6 — back arc; 7–8 — Northeast Japan arc, Middle Miocene-Pliocene (Ikeda, 1998; Okamura et al., 2016; Shuto et al., 2006, 2013, 2015; Takanashi et al., 2011): 7 — volcanic front; 8 — back arc.

о. Кунашир и северо-восточной части Японских островов.

Все неогеновые вулканы центральной части о. Итуруп по соотношению кремнезема и щелочности (рис. 3а) относятся к субщелочной серии. Для них характерны низкие содержания  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MgO}$  и высокие  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Вулканы фронтальной зоны (скв. 54), как и часть базальтов тыловой, характеризуются низкими концентрациями  $\text{K}_2\text{O}$  и попадают

либо в поле низкокалиевой серии классификационной диаграммы  $\text{SiO}_2$ – $\text{K}_2\text{O}$  (рис. 3б), либо располагаются вблизи нижней границы умеренно-калиевой серии. Даци́ты (скв. 50) отличаются более высокими концентрациями калия. На дискриминантной диаграмме  $\text{SiO}_2$ – $\text{FeO}^*/\text{MgO}$  (рис. 3в) составы неогеновых лав фронтальной, как и тыловой зон располагаются в области состава пород известково-щелочной и толеитовой серий.



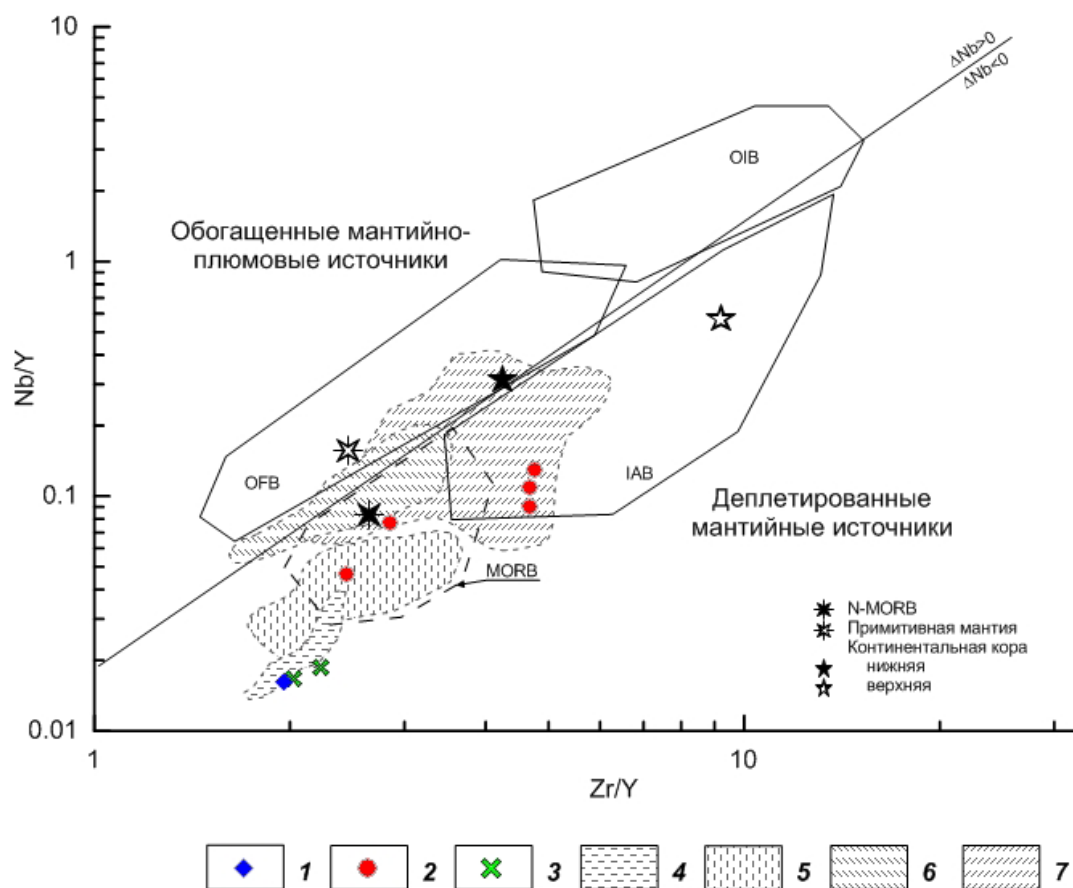
**Рис. 5.** Распределение редкоземельных элементов в среднемиоцен-раннеплиоценовых вулканических породах о. Итуруп. Условные обозначения представлены на рис. 4.

**Fig. 5.** Distribution plot of rare-earth elements in Middle Miocene-Pliocene volcanic rocks from Iturup Island. See legend in Fig. 4.

Вариации содержаний некогерентных элементов неогеновых вулканических пород центральной части о. Итуруп, нормированные к составу N-MORB ( $C_i/C_{N-MORB}$ , (Sun, McDonough, 1989)) и редкоземельных — к хондриту ( $C_i/C_{ch}$ , (Evensen et al., 1978)), показаны на спайдерграммах (рис. 4).

Все вулканические породы зон обогащены крупноионными литофильными элементами и Pb, но деплетированы в отношении Nb и части высокочarged элементов, что позволяет относить их к типичным представителям островодужной серии. Однако, как и в лавах о. Кунашир (Мартынов, 2013; Мартынов и др., 2015; Martynov et al., 2010) и северо-восточной Японии (Ikeda,

1998; Okamura et al., 2016; Shuto et al., 2006, 2013, 2015; Takanashi et al., 2011), отмечается ряд различий между составом фронтальных и тыловых вулканических пород о. Итуруп. Так, базальтоиды тыловой зоны характеризуются более высокими концентрациями Cr, Ni, Pb, большим обогащением легкими редкоземельными элементами ( $La_n/Sm_n=0.8-1.8$ ;  $La_n/Yb_n=0.9-3.1$ ), отсутствием или слабо выраженными Hf- и Eu-аномалиями (рис. 4). Базальтоиды вулканического фронта напротив, деплетированы в отношении легких лантаноидов ( $La_n/Sm_n=0.6$ ;  $La_n/Yb_n=0.6$ ) и характеризуются положительной Eu-аномалией при выраженном гафниевом минимуме. Дацинты



**Рис. 6.** Диаграмма Nb/Y-Zr/Y для среднемиоцен-раннеплиоценовых базальтоидов о. Итуруп: 1–7 — представлены на рис. 3. Поля составов разных типов базальтов по (Condie, 2005). Средние составы: N-MORB, примитивной мантии, хондрита по (Sun, McDonough, 1989), континентальной коры по (Rudnick, Gao, 2003). OIB — базальты океанических островов, IAB — базальты островных дуг, OFB — базальты океанических плато.

**Fig. 6.** Nb/Y-Zr/Y diagram for Middle Miocene-Pliocene volcanic rocks from Iturup Island: 1–7 see fig. 3. Compositional fields of basalts of different types, by Condie, 2005. Average compositions: N-MORB, primitive mantle, chondrite by (Sun, McDonough, 1989), continental crust, by Rudnick, Gao, 2003. OIB — ocean island basalts, IAB — island arc basalts, OFB — ocean plateau-basalts.

тыловой зоны характеризуются варьирующим поведением некогерентных элементов: отмечаются положительные и отрицательные аномалии Hf и Eu, слабым обогащением или обеднением легкими лантаноидами ( $La_n/Sm_n = 0.9–2.0$ ;  $La_n/Yb_n = 0.8–2.8$ ).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характер распределения петрогенных (низкие содержания титана, высокие глинозема) и редких элементов (обогащение LILE относительно HFSE, отчетливый Nb минимум и Pb, Sr максимумы) в среднемиоценовых-раннеплиоценовых вулканических породах центральной части о. Итуруп свидетельствуют об их формировании в надсубдукционной обстановке. Полученные нами данные по химическому составу вулканических пород позволяют сделать ряд выводов генетического плана и оценить характер

процессов, влиявших на состав исходных расплавов и их эволюцию.

Для оценки природы источников магм вулканитов использовался ряд парных отношений наиболее несовместимых элементов, слабо чувствительных к малоглубинной фракционной кристаллизации, раскрывающих, таким образом, поведение выбранных элементов в мантийном источнике.

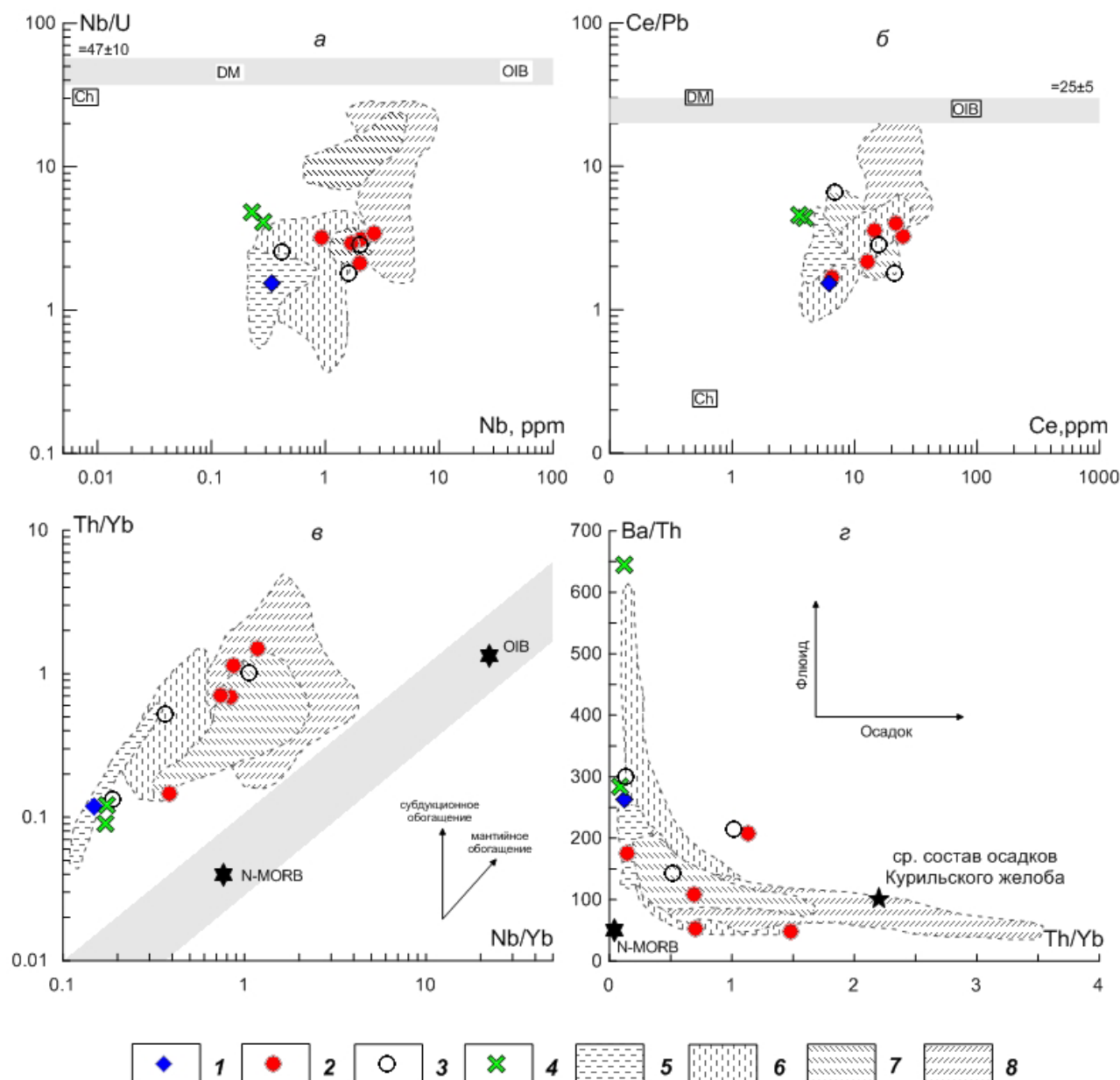
Показано (Condie, 2005), что базальтоиды, имеющие мантийно-плюмовые  $^3\text{He}/^4\text{He}$  изотопные характеристики, на диаграмме Nb/Y-Zr/Y (рис. 6) располагаются выше линии описываемой уравнением регрессии:

$$\log(\text{Nb}/\text{Y}) = 1.92 \times \log(\text{Zr}/\text{Y}) - 1.74.$$

Для характеристики мантийно-плюмовой компоненты используется параметр  $\Delta\text{Nb}$ , определяемый как:

$\Delta\text{Nb} = \log(\text{Nb}/\text{Y}) + 1.74 - 1.92 \times \log(\text{Zr}/\text{Y})$ , при котором значения  $\Delta\text{Nb} > 0$  соответствуют





**Рис. 7.** Диаграммы: Nb/U-Nb (а), Ce/Pb-Ce (б), Th/Yb-Nb/Yb (в) по (Pearce, 2008), Ba/Th-Th/Yb (з) для среднемиоцен-раннеплиоценовых вулканических пород о. Итуруп: 1–8 — представлены на рис. 4. Состав хондрита (Ch), OIB, N-MORB, DM по (Sun, McDonough, 1989), средний состав осадков Курильского желоба по (Plank, Langmuir, 1998).

**Fig. 7.** Nb/U-Nb (a), Ce/Pb-Ce (б), Th/Yb-Nb/Yb (в) by (Pearce, 2008), Ba/Th-Th/Yb (з) diagrams for Middle Miocene-Pliocene volcanic rocks from Iturup Island: 1–8 see fig. 4. Compositions: chondrite (Ch), OIB, N-MORB, DM (Sun, McDonough, 1989), average compositions Kurile trench sediment (Plank, Langmuir, 1998).

базальтам с плюмовой компонентой, а  $\Delta Nb < 0$  — базальтам, генерированным при частичном плавлении истощенной верхней мантии. Неогеновые базальтоиды о. Итуруп располагаются ниже границы состава пород мантийно-плюмового генезиса, занимая как область развития надсубдукционных пород и деплетированных MORB (рис. 6); причем базальты фронтальной зоны (скв. 54) и андезибазальт тыловой (скв. 1К) тяготеют к области наиболее «примитивных» составов. В этих же полях расположены составы

неогеновых базальтов и андезибазальтов фронтальной зоны о. Кунашир, тогда как базальтоиды скв. 50 близки по составу аналогичным породам тыловой зоны северо-восточной части Японских островов и о. Кунашир (рис. 6). Принадлежность неогеновых базальтоидов о. Итуруп к вулканитам, образовавшимся при частичном плавлении истощенной верхней мантии, также подтверждается крайне низкими Nb/Yb отношениями (0.15–0.84), позволяющими оценить степень обогащения источника до его контаминации

коровой или субдукционной компонентой (Di Vincenzo, Rocchi, 1999).

Известно (Hofmann, 1986; Hofmann et al., 1986), что мантийные и коровые выплавки резко различаются между собой по соотношению ниобия, урана, церия и свинца. В мантийных океанических базальтах  $Nb/U = 47 \pm 10$ ,  $Ce/Pb = 25 \pm 5$ , а в породах континентальной коры —  $\sim 10$  и  $3-5$ , соответственно (Hofmann et al., 1986). На конвергентных границах снижение  $Nb/U$  отношения в породах объясняется привнесением урана, миграция которого определяется его высокой подвижностью в окислительных условиях (Фор, 1989), тогда как отношение  $Ce/Pb$  снижается за счет гидротермального переноса свинца в магматические источники (Miller et al., 1994). В вулканических породах о. Итуруп интервалы значений  $Nb/U$  и  $Ce/Pb$  отношений ( $1.5-4.8$  и  $1.5-6.6$ ), свойственны материалу коры и надсубдукционного мантийного клина (рис. 7а, 7б).

Важным геохимическим индикатором присутствия субдукционного компонента (водного флюида/расплава) являются Th, Ba, Rb, Pb, Sr, легко переносимые флюидом, тогда как Ta, Nb, Nd, Y, Ce практически не мобильны во флюиде, но как высоконеккогерентные элементы будут первыми переходить в расплав, образующийся при плавлении плиты (Plank, Langmuir, 1993). Таким образом, величины таких отношений как Th/Yb, Nb/Yb и Ba/Th, не будут существенно изменяться в процессе частичного плавления, тогда как добавка низкотемпературного флюида немедленно отражается на их величине. На диаграмме Th/Yb–Nb/Yb (Pearce, 2008) фигуративные точки состава неогеновых лав располагаются вне поля базальтов N-MORB – OIB и попадают в область пород, формирующихся за счет мантийных источников содержащих субдукционный компонент, либо контаминированных коровым материалом (рис. 7в). Базальтоиды фронтальной зоны о. Итуруп характеризуются наиболее низкими отношениями Th/Yb и Nb/Yb, занимая область одновозрастных деплетированных базальтоидов о. Кунашир, тогда как фигуративные точки базальтоидов тыловой зоны смещены в область задуговых среднемиоцен-плиоценовых пород северо-восточной Японии.

Определенную роль, наряду с низкотемпературным флюидным субдукционным компонентом (Brenan et al., 1995), в образовании тыловодужных неогеновых вулканитов о. Итуруп играли расплавы, образовавшиеся в результате плавления осадков. На диаграмме Ba/Th–Th/Yb (рис. 7г) фигуративные точки лав (скв. 50) смещены в область высоких Th/Yb отношений, что с учетом высоких концентраций Th в океанических осадках и низких валовых коэффици-

ентов распределения в системе осадок–расплавы (Jhonson, Plank, 1999) указывает на вовлечение в магматогенез расплавы, связанных с плавлением осадочного материала. Тогда как субвертикальный тренд для пород фронтальной зоны, может свидетельствовать об определяющей роли низкотемпературного субдукционного флюида (рис. 7д).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение геохимических характеристик среднемиоцен-раннеплиоценовых вулканических пород о. Итуруп позволяет сделать следующие выводы:

- вулканизм среднемиоцен-раннеплиоценового возраста в центральной части о. Итуруп происходил в надсубдукционной обстановке;
- распределение высокочargedных некогерентных элементов в базальтоидах свидетельствует об их формировании при частичном плавлении истощенной верхней мантии;
- обогащение пород крупноионными литофильными элементами свидетельствует как о флюидной мантийной добавке, привнесенной в расплавы в ходе эволюции первичной магмы, так и об участии низкотемпературного надсубдукционного флюида;
- сходство и различие состава базальтоидов фронтальной и тыловой зон из-за ограниченного количества проанализированных образцов рассматриваются как предварительные. Так, базальтоиды тыловой зоны отличаются более высокими концентрациями Th, Pb, HFSE (Nb, Zr, Y, Hf), относительным обогащением LREE, выраженными негативными Zr- и Hf-аномалиями, и положительной Eu.

Авторы выражают благодарность Е.Н. Меланхолиной.

Работа выполнена в рамках государственного плана научно-исследовательских работ: проекты № 0135-2019-0078 (ГИН РАН) и № 0128-2021-0004 (ИО РАН)

## Список литературы [References]

- Атлас Курильских островов / Гл. ред. Н.Н. Комедчиков. М.-Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. 516 с. [Atlas of the Kuril Islands. Ed.: Komedchikov N.N. Moscow-Vladivostok. «DIK» Publ., 2009. 516 p. (in Russian)].
- Витухин Д.И., Орешкина Т.В., Пуцаровский Ю.М., Цуканов Н.В. Новые данные по геологии острова Итуруп (Курильская островная дуга) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1996. Т. 4. № 6. С. 61–74 [Vitukhin D.I., Oreshkina T.V., Pushcharovskii M.Yu., Tsukanov N.V. New data on geology of the Iturup island (Kurile island arc) // Stratigraphy and Geological Correlation. 1996. V. 4. № 6. P. 61–74 (in Russian)].

- Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островодужной системы / Ред. К.Ф. Сергеев, М.Л. Красный. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 36 л. [Geological and geophysical atlas of the Kuril-Kamchatka island arc system. Eds.: K.F. Sergeev, M.L. Krasny. Leningrad, VSEGEI Publ. 1987. 36 p. (in Russian)].
- Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука. 1967. 288 с. [Gorshkov G.S. Volcanism of the Kuril island arc. Moscow: Nauka, 1967. 288 p. (in Russian)].
- Ковтунович П.Ю., Сафронов А.Д., Удодов В.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. 2-е изд. Серия Курильская. Листы L-55-XXII, XXXIII, XXXIV, (Курильск), L-55-XXIII, XXIX, (Рейдово), L-55-XXXIII (влк Тятя), K-55-II, L-55-XXXII (Южно-Курильск). Объяснительная записка СПб.: Изд-во СПб. картфабрики ВСЕГЕИ, 2002. 269 с. [Kovtunovich P.Yu., Safronov A.D., Udodov V.V. et al. The 1:200000 State Geological Map of the Russian Federation. Ser. Kuril. Sheets L-55-XXII, XXXIII, XXXIV (Kurilsk), L-55-XXIII, XXIX (Reydo), L-55-XXXIII (Tyatya Volcano), K-55-II, L-55-XXXII (Yuzhno-Kurilsk). Explanatory Note. St. Petersburg: All-Russ. Sci-Res. Geol. Inst. 2002. 269 p. (in Russian)].
- Мартынов А.Ю. Роль задуговых процессов в формировании поперечной геохимической зональности вулканитов ранних этапов становления о-ва Кунашир // Петрология. 2013. Т. 21. № 5. С. 517–534. <https://doi.org/10.7868/S0869590313040055> [Martynov A.Yu. Role of backarc processes in the origin of across-arc geochemical zoning in volcanics of early evolutionary stages in Kunashir island // Petrology. 2013. V. 21. № 5. P. 471–488. <https://doi.org/10.1134/S086959111304005X>].
- Мартынов А.Ю., Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Кимура Дж.-И. Роль задуговых процессов в происхождении субдукционных магм: новые данные по изотопии Sr, Nd и Pb в вулканитах ранних этапов формирования о. Кунашир (Курильская островная дуга) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 3. С. 469–487. <https://doi.org/10.15372/GiG20150301> [Martynov A.Yu., Martynov Yu.A., Rybin A.V., Kimura J.-I. Role of back-arc tectonics in the origin of subduction magmas: new Sr, Nd, and Pb isotope data from middle miocene lavas of Kunashir island (Kuril Island Arc) // Geologia and Geofizika. 2015. T. 56. № 3. C. 363–378. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.02.001>].
- Пискунов Б.Н. Геолого-петрологическая специфика вулканизма островных дуг / М.: Наука, 1987. 237 с. [Piskunov B.N. Geological significance of volcanism of island arcs. Moscow: Nauka, 1987. 237 p. (in Russian)].
- Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с. [Faure G. Principles of isotope geology. M.: Mir, 1989. 590 p.].
- Фролова Т.И., Бурикова И.А., Гушин А.В., Фролов В.Т. и др. Происхождение вулканических серий островных дуг. М.: Недра, 1985, 275 с. [Frolova T.I., Burikova I.A., Gushin A.V., Frolov V.T. et al. Origin of the volcanic island arc series. Moscow: Nedra, 1985. 275 p. (in Russian)].
- Brenan J.M., Shaw H.F., Ryerson F.J. et al. Experimental-determination of trace-element partitioning between pargasite and a synthetic hydrous andesitic melt // Earth and Planetary Science Letters. 1995. V. 135. P. 1–11. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00139-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00139-4).
- Condie K. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. V. 79. P. 491–504. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.014>.
- Evensen N.M., Hamilion P.J., O’Nions R.K. Rare earth abundances in chondritic meteorites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1978. V. 42. P. 1199–1212. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90114-X).
- Fedyunina N.N., Seregina I.F., Bolshov M.A. et al. Investigation of the efficiency of the sample pretreatment stage for the determination of the Rare Earth Elements in rock samples by inductively coupled plasma mass spectrometry technique // Analytica Chimica Acta. 2012. V. 713. P. 97–102. (<https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.11.035>).
- Hofmann A.W. Nb in Hawaiian magmas: constraints on source composition and evolution // Chemical Geology. 1986. V. 57. № 1. P. 17–30. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90091-4).
- Hofmann A.W., Jochum K.P., Seufert M., White W.M. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution // Earth and Planetary Science Letters. 1986. V. 79. № 1–2. P. 33–45. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90038-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90038-5).
- Ikeda Y. Geochemistry of Miocene back-arc basin basalts from northeast Hokkaido, Japan // The Journal of the Geological Society of Japan. 1998. V. 104. № 2. P. 99–106. <https://doi.org/10.5575/geosoc.104.99>.
- Irvine T.N., Baragar W.R.A. A guide to the chemical classification on the common volcanic rocks // Can. J. Earth Sci. 1971. V. 8. P. 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>.
- Ishizuka O., Kimura J.-I., Li Y.B. et al. Early stages in the evolution of Izu–Bonin arc volcanism: New age, chemical, and isotopic constraints // Earth and Planetary Science Letters. 2006. V. 250. P. 385–401. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.08.007>.
- Jhonson M.C., Plank T. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments // Geochemistry Geophysics Geosystem (G3). 1999. V. 13. <https://doi.org/10.1029/999GC000014>.
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram // Journal of Petrology. 1986. V. 27. P. 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.
- Martynov A.Yu., Kimura J.-I., Martynov Yu.A., Rybin A.V. Geochemistry of late Cenozoic lavas on Kunashir Island, Kurile Arc // Island Arc. 2010. V. 19. P. 86–104. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2009.00684.x>.
- Miller D.M., Goldstein S.L., Langmuir C.H. Cerium/lead and lead isotope ratios in arc magmas and the enrichment of lead in the continents // Nature. 1994. V. 368. P. 514–520. <https://doi.org/10.1038/368514a0>.
- Miyashiro A. Volcanic rock series in island arc and active continental margins // American Journal of Science. 1974. V. 274. № 4. P. 321–355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>.
- Okamura S., Inaba M., Adachi Y., Shinjo R. Miocene–Pliocene mantle depletion event in the northern Fossa Magna, western NE Japan // Journal of Geodynamics. 2016. V. 97. P. 42–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2016.03.007>.

- Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // *Lithos*. 2008. V. 100. P. 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>.
- Plank T., Langmuir C.H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle // *Chemical Geology*. 1998. V. 145. № 3–4. P. 325–394. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00150-2).
- Rudnick R., Gao S. Composition of the continental crust // *The crust* (ed. R.L. Rudnick). 2003. V. 3. Treatise on Geochemistry (eds. H.D., Holland and K.K., Turekian). Elsevier-Pergamon, Oxford, P.1–64. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>.
- Shuto K., Ishimoto H., Hirahara Y., Sato M. Geochemical secular variation of magma source during Early to Middle Miocene time in the Niigata area, NE Japan: Asthenospheric mantle upwelling during back-arc basin opening // *Lithos*. 2006. V. 86. P. 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.06.001>.
- Shuto K., Sato M., Kawabata H., Osanai Y. Petrogenesis of middle Miocene primitive basalt, andesitic and garnet-bearing adakite rhyodacite from the Ryozen Formation: implication for the tectono-magmatic evolution of the NE Japan arc // *Journal of Petrology*. 2013. V. 54. P. 2413–2454. <https://doi.org/10.1093/petrology/egt052>.
- Shuto K., Nohara-Imanaka R., Sato M et al. Across-arc Variations in Geochemistry of Oligocene to Quaternary Basalts from the NE Japan Arc: Constraints on Source Composition, Mantle Melting and Slab Input Composition // *J. of Petrology*. 2015. V. 56. № 11. P. 2257–2294. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv073>.
- Stern R.J. Subduction initiation: spontaneous and induced // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 226. P. 275–292. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.08.007>.
- Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts. In: *Magmatism in ocean basin*. Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geol. Soc. Spec. Publ. London. 1989. V. 42. P. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.
- Takanashi K., Shuto K., Sato M. Origin of Late Paleogene to Neogene basalts and associated coeval felsic volcanic rocks in Southwest Hokkaido, northern NE Japan arc: constraints from Sr and Nd isotopes and major- and trace-element chemistry // *Lithos*. 2011. V. 125. 368–392. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.02.020>.

## VOLCANISM OF THE EARLY FORMATION STAGE OF ITURUP ISLAND (GREAT KURILE CHAIN)

P.I. Fedorov<sup>1</sup>, N.V. Tsukanov<sup>2</sup>, A.R. Geptner<sup>1</sup>, V.V. Petrova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geological Institute RAS, Moscow, Russia, 119017; e-mail: pi\_fedorov@mail.ru

<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 117997;  
e-mail: kambear2011@yandex.ru

The article presents new petrogeochemical data on the Middle Miocene-Pliocene volcanic rocks from central part of Iturup Island (Great Kurile Chain). It is shown that volcanism of the Middle Miocene-Early Pliocene age in the central part of the Iturup Island took place in a suprasubduction setting. The distribution of high field strength elements (HFSE) and their ratio in the basaltoids indicate their formation upon partial melting of the depleted upper mantle, while the enrichment of rocks with large ionic lithophilic elements (LILE) indicates both a fluid mantle additive introduced into the melts during the evolution of primary magma and the participation of a low-temperature suprasubduction fluid. The established differences in the composition of the basaltoids of the frontal and rear zones due to the limited number of analyzed samples are considered preliminary. Thus, basaltoids in the rear zone are distinguished by higher concentrations of Th, Pb, HFSE (Nb, Zr, Y, Hf), relative enrichment in LREE, pronounced negative Zr and Hf anomalies, and positive Eu.

**Keywords:** volcanism, geochemistry, Neogene, Iturup Island, Kurile island arc.

Поступила в редакцию 15.01.2021 г.

После доработки 04.03.2021 г.

Принята в печать 28.03.2021 г.