

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ГЕТЕРОГЕННОСТЬ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД ТЕРРЕЙНОВ ОСТРОВОДУЖНОЙ ПРИРОДЫ ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ

© 2025 Н.В. Цуканов¹, П.И. Федоров², Д.В. Коваленко³

¹ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, 117997;
e-mail: kambear2011@yandex.ru

²ФГБУН Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: pi_fedorov@mail.ru

³ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: Dmitry@igem.ru

Поступила в редакцию 25.02.2025; после доработки 23.04.2025; принята в печать 25.06.2025

Показаны различия вещественного состава пород, слагающих отдельные вулканические поля в пределах островодужных террейнов Камчатки. Установлено, что для меловых пород северных сегментов Кроноцкого террейна характерны вулканиты низкокальциевой толеитовой серии, среди южных — породы известково-щелочной. Эоценовый вулканизм представлен относительно однородными вулканитами толеитовой серии. Состав вулканитов Озерновско-Валагинского террейна (палеодуги) более разнообразен и отличается развитием пород высококальциевых серий. Изотопно-геохимический анализ базальтов Кроноцкого и Озерновско-Валагинского террейнов позволяет говорить, в целом, о деплетированной природе глубинных источников магмы, и что в образовании магм участвовали различные по составу компоненты — надслэбовая, OIB и N-MORB, в разных соотношениях. Поведение флюидномобильных элементов среди базальтов показывает, что их концентрации превышают таковые в N-MORB, свидетельствуя об участии в разной степени флюидов и расплавов в процессе магмогенерации.

Ключевые слова: Камчатка, вулканизм, геохимия, изотопия, островодужные системы, геодинамика.

ВВЕДЕНИЕ

Олюторско-Камчатская аккреционно-коллизийная область, являющаяся частью Азиатской окраины, и образованная сложным ансамблем тектоностратиграфических террейнов позднемелового-палеогенового возраста, имеющих островодужную, окраинноморскую и океаническую природу, была сформирована в кайнозойское время.

Мел-палеогеновые образования Восточной Камчатки участвуют в строении трех крупных протяженных террейнов: Озерновско-Валагинского (ОВ), являющегося фрагментом Ачайваям-Валагинского, Кроноцкого (Кр) и Ветловского (Вт). ОВ и Кр имеют островодужный генезис, а Вт, который их разделяет в современной структуре — окраинноморскую (рис. 1). Возрастной диапазон вещественных ассоциаций, слагающих островодужные террейны, определяется

как сантон-кампан-раннепалеогеновый для ОВ и коньяк-эоценовый для Кр (Геологическая..., 2005), что указывает на близкий возраст заложения этих структур. В строении Вт участвуют кампан-эоценовые вещественные комплексы.

До настоящего времени обсуждается вопрос о количестве позднемеловых-палеогеновых дуг, механизмах их возникновения и развития, а также вопрос о расстоянии на которое они были перемещены до аккреции к Камчатской окраине (Аккреционная..., 1993; Коваленко, 2001; Чехович, Сухов 2009 и др.; Шапиро, Соловьев, 2009). Высказывается мнение о существовании в позднем мелу единой Олюторско-Камчатской (Ачайваям-Валагинской) дуги и ее расколе в палеоцене на Озерновско-Валагинскую и Кроноцкую вулканические дуги с образованием Ветловского междугового бассейна (Чехович, Сухов, 2009).

В работе (Сухов и др., 2004) проанализированы основные палеотектонические реконструкции

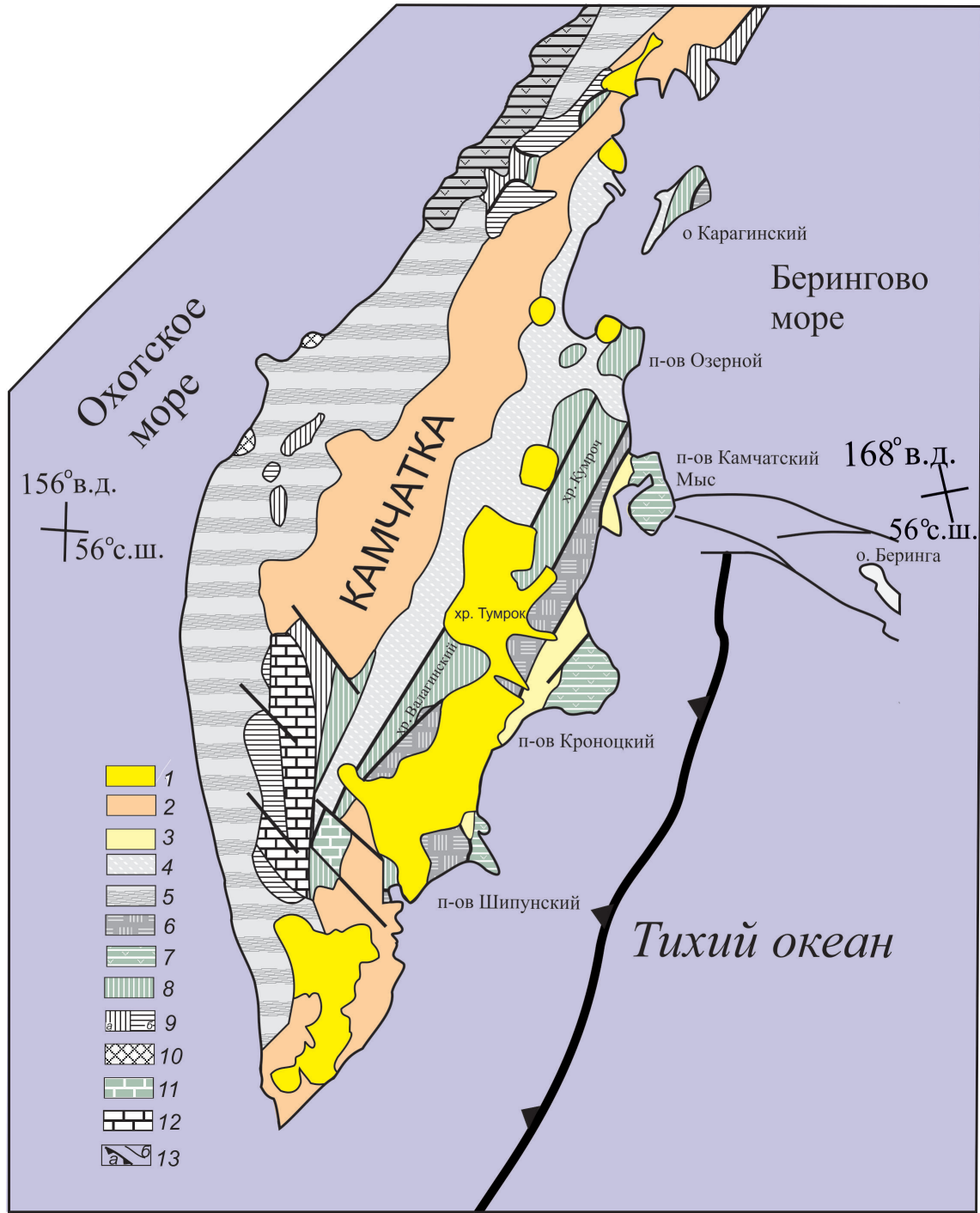


Рис. 1. Схема тектонического районирования Олюторско-Камчатской аккреционной области. 1–2 — вулканические пояса: 1 — Восточно-Камчатский вулканический пояс (N_2-Q), 2 — Центрально-Камчатский-Олюторский (P_3-Q); 3–5 — наложенные впадины и прогибы: 3 — Восточно-Камчатский прогиб (P_2-N_1); 4 — Центрально-Камчатская депрессия (P_3-Q), 5 — Западно-Камчатский прогиб (P_2-N_1); 6–9 — тектоно-стратиграфические террейны: 6 — Ветловский (K_2-P_2), 7 — Кроноцкий (K_1-P_2), 8 — Озерновско-Валагинский террейн (K_2-P_1), 9 — Западно-Камчатский (K_1-P_2), комплексы: а — ирунейский, б — лесновский; 10 — комплексы Азиатской окраины ($J-K_2$); 11–12 — метаморфические комплексы Камчатки: 11 — Ганальского хребта, 12 — Срединного хребта; 13 — разломы: а — недифференцированные, б — надвиги.

Fig 1. Tectonic scheme of the Olyutorka-Kamchatka accretionary zone: 1–2 — volcanic belts: 1 — East Kamchatka (N_2-Q), 2 — Central Kamchatka-Olyutorka (P_3-Q); 3–5 — superimposed depressions and troughs: 3 — Eastern Kamchatka (P_2-N_1), 4 — Central Kamchatka Depression, 5 — Western Kamchatka (P_2-N_1); 6–9 — tectonostratigraphic terranes: 6 — Vetlovsky (K_2-P_2), 7 — Kronotsky (K_1-P_2), 8 — Ozernovsko-Valaginsky (K_2-P_1), 9 — Western Kamchatka (K_1-P_2), complexes: a — Iruneysky, b — Lesnovsky; 10 — Asia margin complexes ($J-K_2$); 11–12 — metamorphic complexes of the Kamchatka: 11 — Ganal Ridge, 12 — Sredinny Kamchatka massif; 13 — faults: a — undifferentiated, b — thrusts.

для островодужных террейнов Камчатки и сделан вывод, что они формировались на существенно меньшем расстоянии от континентальной окраины, чем это предполагается при палеотектонических реконструкциях на основе палеомагнитных данных. Предполагается, что в поздне меловое — палеогеновое время островные дуги располагались аналогично современным дугам Тихого океана (Сухов и др., 2004).

Проведенный анализ (Цуканов и др., 2021) строения вещественных комплексов перекрывающих осадочных бассейнов и данные трекового датирования апатитов показывает, что процесс аккреции Кр проходил не одновременно. Этапы аккреции фиксируются в олигоцен-раннемиоценовое и ранне-среднемиоценовое время. Они отражают продолжающуюся коллизию Кр с Камчатской окраиной. В тоже время остается открытым вопрос о начальных этапах развития восточнокамчатских палеодуг. Близкий возраст наиболее древних вулканических комплексов ОВ и Кр, схожесть составов офиолитовых комплексов различных сегментов Кр и ОВ в пределах Восточной Камчатки говорят о возможном развитии этих дуг на начальном этапе как единой структуры.

Исследования последних лет (Федоров и др., 2013; Цуканов и др., 2009, 2024; Цуканов, Федоров 2023 и др.), наряду с ранее полученными изотопно-геохимическими данными по составу вулканических комплексов мел-палеоценовых террейнов Восточной Камчатки, позволяют более аргументированно осветить вопросы петрогенезиса магматических комплексов, геодинамики региона и объяснить особенности многокомпонентного состава глубинных источников, участвовавших в образовании этих структур.

Ранее было показано, что состав вулканических комплексов Ветловского террейна неоднороден и меняется в различных сегментах (Цуканов, Федоров, 2023). Также, изучение ОВ показало, что наблюдается гетерогенность составов вулканических комплексов, слагающих отдельные вулканические поля палеодуг по простиранию, вкрест простирания и во времени (Коваленко и др., 2009; Сухов и др., 2016; Цуканов, Сколотнев, 2010; Цуканов и др., 2009, 2024; Portnyagin et al., 2008; Tsukanov et al., 2007 и др.).

Настоящая работа преследует своей целью показать результаты наших исследований мел-палеогеновых вулканических комплексов Восточной Камчатки, с анализом и использованием опубликованных ранее данных. Основная задача исследования сводится к анализу пространственного распределения пород с различными геохимическими характеристиками в масштабе Восточных хребтов и п-вов Камчатки, с целью

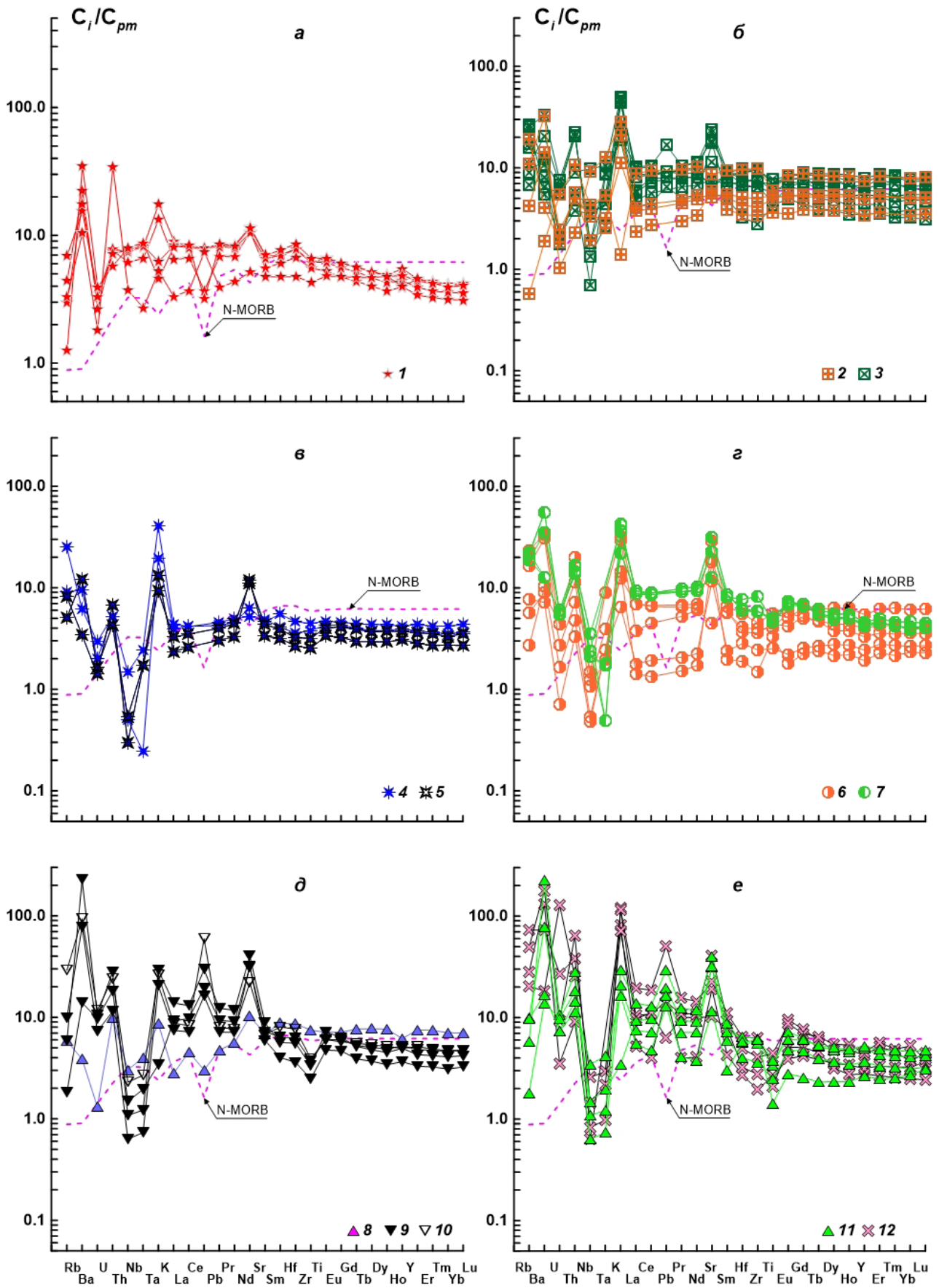
определения компонентного состава мантийных или коровых источников для выяснения общих закономерностей развития глубинного магматизма, выяснении возможных геодинамических условий формирования вулканических поясов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В состав **Кроноцкого террейна** входят вещественные комплексы, которые формировались в пределах вулканической палеодуги на коре океанического типа на протяжении длительного времени с позднего мела до середины эоцена (Левашова и др., 2000; Шапиро, Соловьев, 2009; Цуканов, 2018). Кроноцкий террейн островодужной природы был аккретирован к Камчатской окраине в конце эоцена — миоцене (Аккреционная..., 1993; Цуканов, 2018; Alexeiev et al., 2006). Фрагменты террейна обнажаются в пределах Восточных п-овов Камчатки: Камчатский (Камчатский Мыс), Кроноцкий, Шипунский и представлены верхнемеловыми-эоценовыми магматическими, вулканогенно-туфогенными и туфогенно-осадочными комплексами (рис. 1). Образование Кроноцкого террейна со стратиграфическим и угловым несогласием перекрыты терригенными прибрежно-морскими отложениями олигоцен-миоценового возраста (Государственная..., 2006а).

Кроме вулканогенно-осадочных образований верхнего мела-эоцена в пределах Кроноцкого террейна (за исключением Шипунского сегмента) присутствуют офиолитовые комплексы, представленные габбро, долеритами, базальтами, гипербазитами и плагиогранитами (Аккреционная..., 1993; Батанова и др., 2014; Государственная..., 2007; Цуканов, 2018). Необходимо отметить, что часть офиолитов п-ова Камчатский Мыс (альб-сеноманские базальты и часть ультрамафитов п-ова Камчатский Мыс по данным (Батанова и др., 2014; Портнягин и др., 2005)) формировались под воздействием «Протогавайского плюма». Эти комплексы входят в состав аккреционной призмы палеоэоценовой Кроноцкой дуги и формировались в океанической обстановке (рис. 2а).

Выделяются три сегмента: Камчатскомысский (северный), Кроноцкий (центральный) и Шипунский (южный), которые соответствуют восточным п-овам Камчатки (рис. 1). Ранее было показано (Геологическая..., 1992; Государственная..., 2007; Сколотнев и др., 2008; Цуканов, 2018), что в северных сегментах для меловых комплексов характерны вулканы низкокалиевой толеитовой серии, а в южном сегменте преимущественно развиты породы известково-щелочной серии. Эоценовый вулканизм



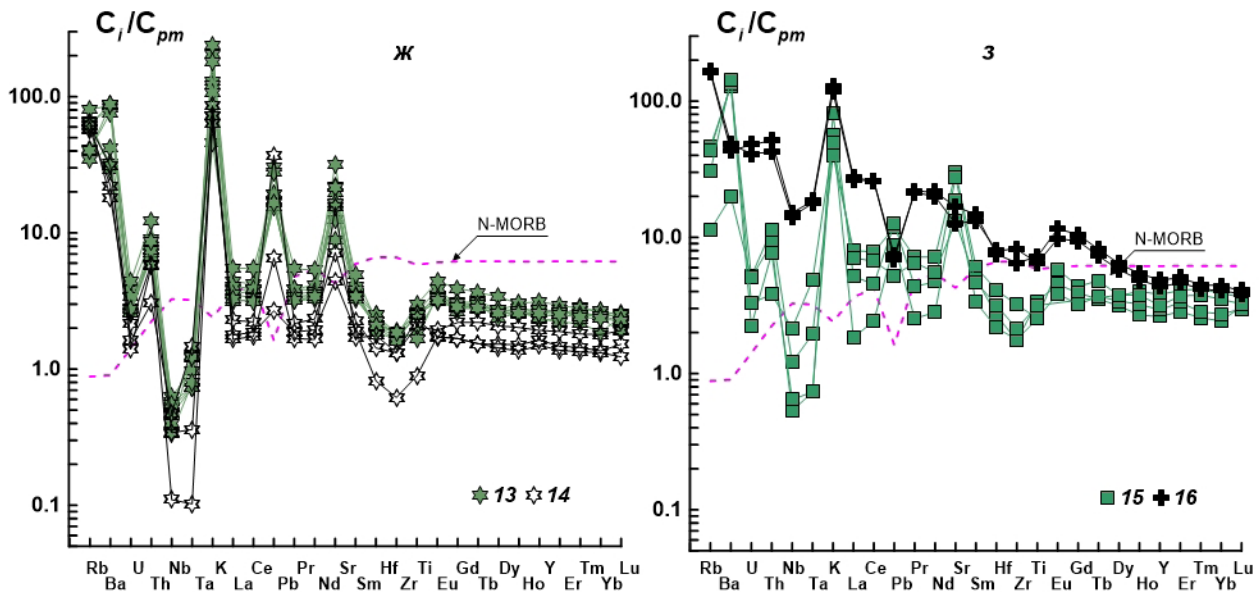


Рис 2. Распределение редких и редкоземельных элементов в позднекрейдовом-палеогеновых магматических породах тектоностратиграфических террейнов Восточной Камчатки, нормированные к примитивной мантии (C_i/C_{pm} , (Sun, McDonough, 1989)). *a–z* — Кроноцкий террейн (палеодуга): *a–б* — Камчатскомый сегмент (Цуканов, 2018; Tsukanov et al., 2007), *в* — Кроноцкий сегмент, базальты (Сколотнев и др., 2008), *г* — Шипунский сегмент (Цуканов, 2018; Цуканов и др., 2009), *д–з* — Озерновско-Валагинский сегмент Ачайваям-Валагинского террейна (палеодуга): *д–е* — хребет Кумроч, *ж* — хребет Тумрок, *з* — Валагинский хребет. 1 — комплексы основания палеодуги, смагинская свита (новые данные; Portnyagin et al., 2008, Tsukanov et al., 2007); 2 — толща р. Непропускская; 3 — столбовская серия; 4 — каменистская свита; 5 — кроноцкая серия; 6 — шипунская толща; 7 — налычевская толща; 8 — комплексы основания палеодуги, меланж; 9–10 — о-в Карагинский, комплексы (Коваленко и др., 2009; Кравченко-Бережной, 1989): 9 — кремнисто-вулканогенный, базальты, 10 — вулканогенно-обломочный, андезит; 11 — базальты, хапицкая свита (Коваленко и др., 2009; Цуканов и др., 2009; Сухов и др., 2016); 12 — шошониты (Коваленко и др., 2009); 13 — базальты, хапицкая свита (Колосков и др., 2009; Chayka et al., 2023); 14 — габбро и долериты Андриановского массива (Ескин и др., 2007; Цуканов, Сколотнев, 2010; Chayka et al., 2023); 15 — базальты, попутновский комплекс (Колосков и др., 2009); 16 — шошониты, китильгинская свита (Федоров и др., 2013). Пунктиром показан средний состав N-MORB по (Sun, McDonough, 1989).

Fig. 2. Distribution plot of trace elements in Late Cretaceous-Early Paleogene igneous rocks of tectonostratigraphic terranes of Eastern Kamchatka, normalized to the primitive mantle (C_i/C_{pm} , (Sun, McDonough, 1989)). *a–z* — Kronotsky terrane (paleoarc): *a–b* — Kamchatka Mys segment (Tsukanov et al., 2007, Tsukanov, 2018), *v* — Kronotsky segment, basalts (Skolotnev et al., 2008), *g* — Shipunsky segment (Tsukanov et al., 2009; Tsukanov, 2018); *d–z* — Ozernoy-Valagin segment of Achaivayam-Valaginsky terrane (paleoarc): *d–e* — Kumroch range, *zh* — Tumrok range, *z* — Valaginsky range. 1 — paleoarc base complexes, Smagin Formation (unpublished data; Portnyagin et al., 2008; Tsukanov et al., 2007); 2 — Nepropuskovy stream Formation, 3 — Stolbovsky Formation; 4 — Kamenistky Formation; 5 — Kronotsky Formation; 6 — Shipunsky; 7 — Nalychevsky; 8 — paleoarc base complexes, melang; 9–10 — Karaginsky isl., complexes (Kovalenko et al., 2009; Kravchenko-Berezhnoi, 1989): 9 — siliceous-volcanogenic, 10 — volcanogenic-clastic; 11 — Khapitzkay Formation, basalts (Kovalenko et al., 2009; Sukhov et al., 2016); 12 — shoshonites (Kovalenko et al., 2009); 13 — Khapitzkay Formation, basalts (Chayka et al., 2023; Koloskov et al., 2009); 14 — Andrianovsky pluton gabbro and dolerites (Chayka et al., 2023; Eskin et al., 2007; Tsukanov, Skolotnev, 2010); 15 — Poputnaya Formation, basalts (Koloskov et al., 2009); 16 — shoshonites, Kitilginskaya Formation (Fedorov et al., 2013). Dotted lines denote is the average N-MORB composition by (Sun, McDonough, 1989).

представлен однородными по химическому составу вулканитами толеитовой серии (Цуканов, 2018; Хубуная, 1987).

Камчатскомый сегмент. Вещественные комплексы палеодуги представлены верхнемеловой толщей р. 1-ая Непропускская (южная часть п-ова Камчатский Мыс) и породами столбовской серии маастрихт-эоценового возраста, слагающими северную часть п-ова (Государственная..., 2007; Сколотнев и др., 2008; Цуканов, 2018).

Толща 1-ая Непропускская представлена базальтами, андезибазальтами, трахибазальтами, трахиандезибазальтами, реже дацитами и риолитами, переслаивающимися с туфами и кремнистыми породами. Все изученные породы имеют низкие содержания титана (до 1.05 % TiO_2). Содержания оксида калия варьируют в значительных пределах от 0.02 % до 1.88 %. Спайдерграммы большинства базальтов (рис. 2б) имеют типоморфные признаки

островодужных вулканитов: отчетливо выраженную отрицательную аномалию в области ниобия и тантала и высокие концентрации крупноионных литофильных элементов. Все изученные породы характеризуются низкими Zr/Y отношениями (2.0–3.3) и Nb/Y (0.06–0.13), низкими концентрациями цериевых лантаноидов ((La/Sm)_n=0.6–0.9, (La/Yb)_n=0.6–1.0). Базальты толщи характеризуются значениями отношений Th/Yb=0.05–0.13, Ba/Th=14–200, Rb/Th=75–150.

Величины изотопных отношений составляют: εNd=10.4–11.2, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.70319–0.70389 (рис. 3), ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb=18.170–18.273, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb=15.483–15.504, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb=37.797–37.869 (рис. 4).

В столбовской серии развиты преимущественно базальты и андезибазальты, а также присутствуют гипабиссальные субвулканические тела габбро и дайки долеритов. Базальты представлены преимущественно высокоглиноземистыми разностями и реже встречаются

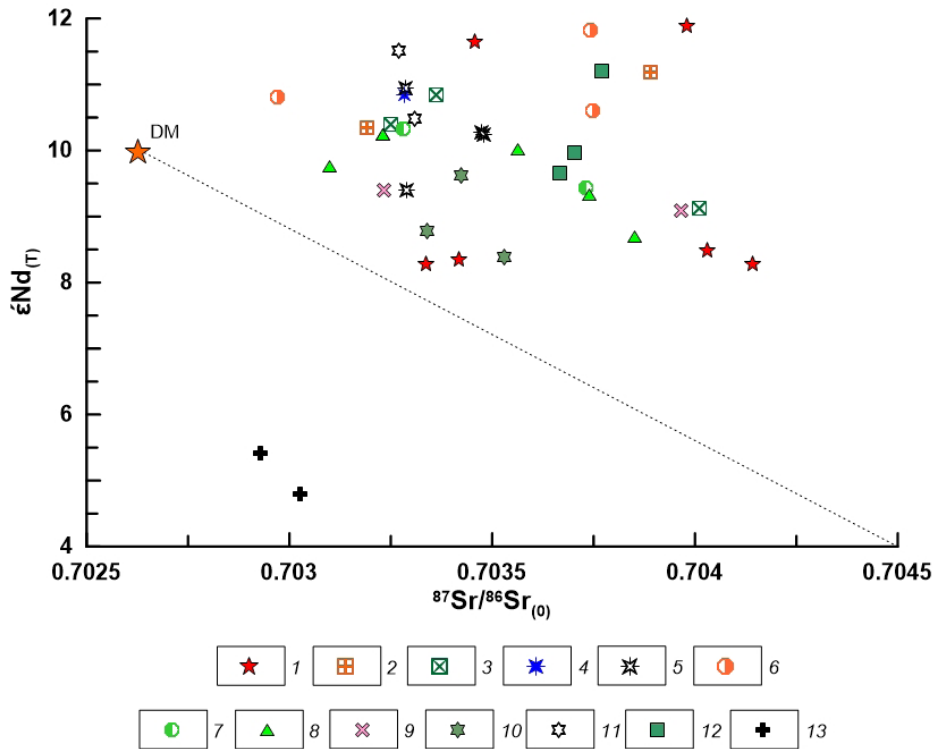


Рис. 3. Диаграмма εNd_(T)-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr для позднемеловых-палеогеновых магматических пород тектоностратиграфических террейнов Восточной Камчатки. 1–7 — Кроноцкий террейн (палеодуга): 1 — комплексы основания палеодуги, смагинская свита (новые данные; Portnyagin et al., 2008); 2–3 — Камчаткомысский сегмент (Цуканов, 2018; Tsukanov et al., 2007): 2 — толща р. 1-ая Непропускская, 3 — столбовская серия; 4–5 — Кроноцкий сегмент (Сколотнев и др., 2008): 4 — каменистская свита, базальты, 5 — кроноцкая серия, базальты; 6–7 — Шипунский сегмент, толщи (Цуканов и др., 2009; Цуканов, 2018): 6 — шипунская, 7 — налычевская; 8–13 — Озерновско-Валагинский сегмент Ачайваям-Валагинского террейна (палеодуги): 8–9 — хребет Кумроч: 8 — базальты, хапицкая свита (Коваленко и др., 2009; Сухов и др., 2016; Цуканов и др., 2009), 9 — шошониты (Коваленко и др., 2009); 10–11 — хребет Тумрок: 10 — базальты, хапицкая свита (Колосков и др., 2009; Чайка et al., 2023), 11 — габбро и долериты Андриановского массива (Ескин и др., 2007; Цуканов, Сколотнев, 2010; Чайка et al., 2023); 12–13 — Валагинский хребет: 12 — базальты, попутновский комплекс (Колосков и др., 2009), 13 — шошониты, китильгинская свита (Федоров и др., 2013). Штриховая линия — линия мантийной корреляции.

Fig. 3. The ratio of εNd_(T) and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr₍₀₎ in Late Cretaceous-Early Paleogene igneous rocks of tectonostratigraphic terranes of Eastern Kamchatka. 1–7 — Kronotsky terrane (paleoarc): 1 — paleoarc base complexes, Smagin Formation (Portnyagin et al., 2008; Tsukanov, unpublished data); 2–3 — Kamchatka Mys segment (Tsukanov, 2018; Tsukanov et al., 2007): 2 — Nepropuskovy stream Formation, 3 — Stolbovsky Formation; 4–5 — Kronotsky segment, basalts (Skolotnev et al., 2008): 4 — Kamenistky Formation, 5 — Kronotsky Formation; 6–7 — Shipunsky segment, formations (Tsukanov et al., 2009; Tsukanov, 2018): 6 — Shipunsky, 7 — Nalychevsky; 8–13 — Ozeronoy-Valaginsky segment of Achaivayam-Valaginsky terrane (paleoarc): 8–9 — Kumroch range: 8 — Khapitzkay Formation, basalts (Kovalenko et al., 2009; Sukhov et al., 2016), 9 — shoshonites (Kovalenko et al., 2009); 10–11 — Tumrok range: 10 — Khapitzkay Formation, basalts (Chayka et al., 2023; Koloskov et al., 2009), 11 — Andrianovsky pluton gabbro and dolerites (Chayka et al., 2023; Eskin et al., 2007; Tsukanov and Skolotnev, 2010); 12–13 — Valaginsky range: 12 — Poputnaya Formation, basalts (Koloskov et al., 2009), 13 — shoshonites, Kitilginskaya Formation (Fedorov et al., 2013). Dashed line in inset shows the mantle correlation array.

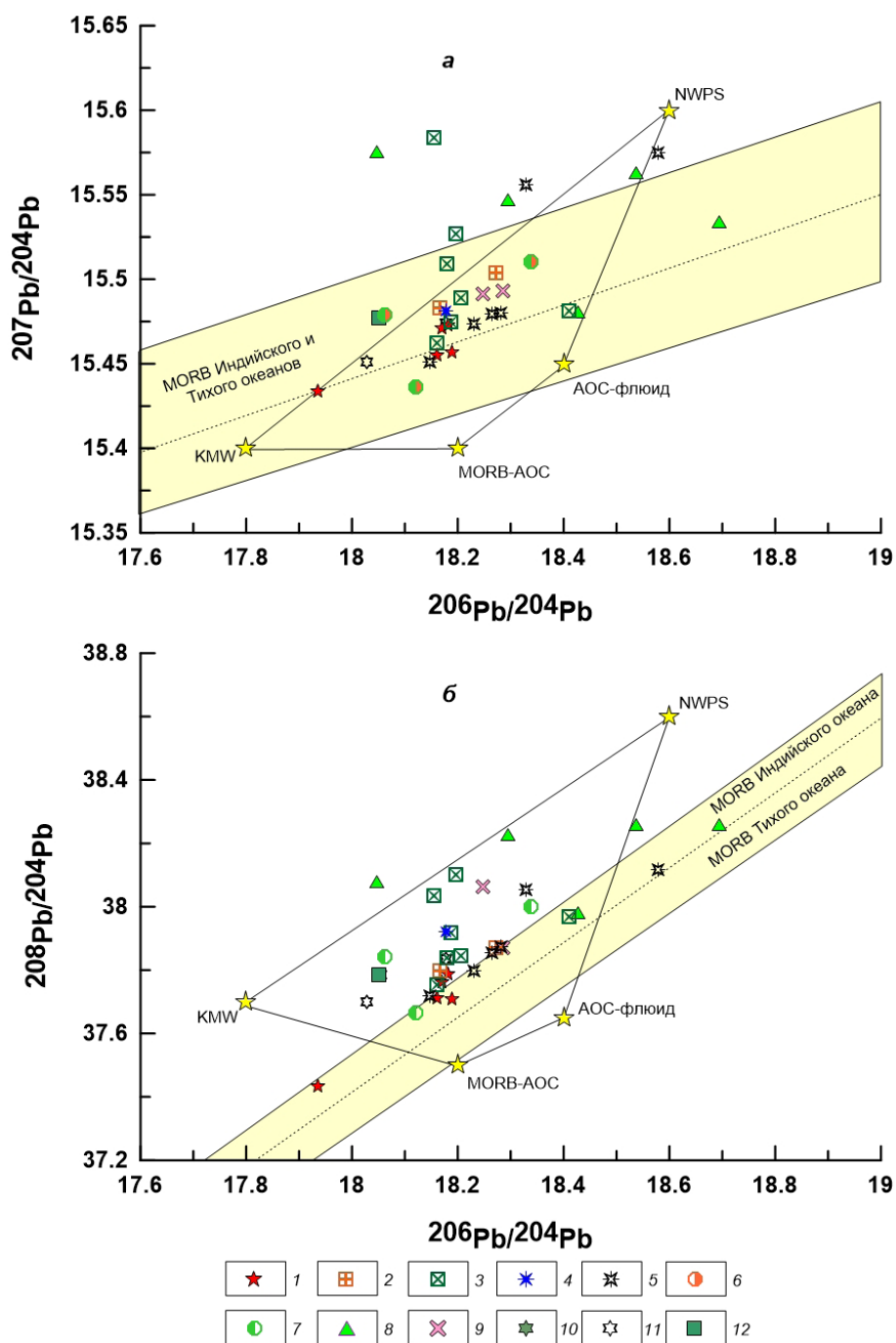


Рис. 4. Соотношения $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (а) и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (б) в позднекампан-раннепалеогеновых магматических породах тектоностратиграфических террейнов Восточной Камчатки. 1–7 — Кроноцкий террейн (палеодуга): 1 — комплексы основания палеодуги, смагинская свита (новые данные; Portnyagin et al., 2008); 2–3 — Камчаткомысский сегмент (Цуканов, 2018; Tsukanov et al., 2007): 2 — толща р. 1-ая Непропусксовая, 3 — столбовская серия; 4–5 — Кроноцкий сегмент (Сколотнев и др., 2008): 4 — каменистская свита, базальты, 5 — кроноцкая серия, базальты; 6–7 — Шипунский сегмент, толщи (Цуканов, 2018; Цуканов и др., 2009): 6 — шипунская, 7 — нальчевская; 8–12 — Озерновско-Валагинский сегмент Ачайва-Валагинского террейна (палеодуги): 8–9 — хребет Кумроч: 8 — базальты, хапицкая свита (Коваленко и др., 2009; Сухов и др., 2016; Цуканов и др., 2009), 9 — шошониты (Коваленко и др., 2009); 10–11 — хребет Тумрок: 10 — базальты, хапицкая свита (Колосков и др., 2009; Chauka et al., 2023), 11 — габбро и долериты Андриановского массива (Ескин и др., 2007; Цуканов, Сколотнев, 2010; Chauka et al., 2023); 12 — Валагинский хребет, базальты, попутновский комплекс (Колосков и др., 2009). MORB-AOC — состав измененных базальтов Восточно-Камчатских офиолитов по (Duggen et al., 2007); KMW — камчатский мантийный клин, NWPS — средний состав осадков Северо-Западной Пацифики по (Portnyagin et al., 2015), AOC-флюид по (Ishizuka et al., 2006). Корреляция состава неизменных базальтов Тихого и Индийского океанов по (Class, Lehnert, 2012).

умеренно глиноземистые. По содержанию титана выделяются низкотитанистые разновидности ($< 1 \% \text{TiO}_2$) и со средними содержаниями TiO_2 до 1.5 %. Содержания K_2O изменяются в интервале 0.34–1.4 %. Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) слабо фракционированное: $((\text{La}/\text{Sm})_n=0.6\text{--}1.5, (\text{La}/\text{Yb})_n=0.8\text{--}2.0)$. Базальты толщи характеризуются значениями отношений $\text{Zr}/\text{Y}=1.0\text{--}3.7, \text{Nb}/\text{Y}=0.03\text{--}0.22, \text{Th}/\text{Yb}=0.1\text{--}0.3, \text{Ba}/\text{Th}=160\text{--}380, \text{Rb}/\text{Th}=12\text{--}40$. Величины изотопных отношений составляют: $\epsilon\text{Nd}=9.1\text{--}10.4, {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}=0.70325\text{--}0.70401$ (рис. 3), ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}=18.179\text{--}18.207, {}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}=15.489\text{--}15.527, {}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}=37.839\text{--}38.101$ (рис. 4).

Кроноцкий сегмент. Вещественные комплексы сегмента сложены верхнемеловыми образованиями каменистой свиты и эоценовыми породами кроноцкой серии и распространены от бух. Ольга на юге до р. Большая Чажма на севере Кроноцкого п-ова (рис. 1) (Государственная..., 2006б, 2007; Хубуная 1987; Цуканов, 2018).

Верхнемеловые толщи представлены потоками базальтов и андезибазальтов с глыбовой и подушечной отдельностью, которые расслаиваются пачками переслаивания гиалокластитов, туфобрекчий, основных туфов алевритовой-псаммитовой размерности, туфосилицитов и кремней и слагают тектонические пластины, разделенные серпентинитовым меланжем (Хубуная, 1987).

Кроноцкая серия разделяется на кубовскую и козловскую свиты (Государственная..., 2006а). Козловская свита сложена преимущественно вулканитами основного состава с многочисленными силлами и дайками габбро и долеритов и по строению сходна с образованиями каменистой свиты. Кубовская свита представлена преимущественно туфами и туфогенно-осадочными породами.

Верхнемеловые и эоценовые базальты и андезибазальты в целом близки по составу; среди них выделяются высокоглиноземистые и железистые разности (Сколотнев и др., 2008;

Хубуная, 1987). Распределение несовместимых элементов для меловых базальтов каменистой свиты и эоценовых кроноцкой серии сходно и представлено на (рис. 2б). Базальты характеризуются низкими концентрациями цериевых лантаноидов $(\text{La}/\text{Sm})_n=0.7\text{--}0.8, (\text{La}/\text{Yb})_n=0.8\text{--}1.1$ и отношениями $\text{Nb}/\text{Y}=0.01\text{--}0.05, \text{Th}/\text{Yb}=0.07\text{--}0.10, \text{Ba}/\text{Th}=180\text{--}400$ и $\text{Rb}/\text{Th}=20\text{--}60$ при различающихся Zr/Y отношениях от 1.9 до 2.7 в меловых базальтах до 3.2–4.4 в эоценовых. Величины изотопных отношений составляют $\epsilon\text{Nd}=9.4\text{--}11.2, {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}=0.70328\text{--}0.70348$ (рис. 3), ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}=18.147\text{--}18.548, {}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}=15.451\text{--}15.575, {}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}=37.718\text{--}38.116$ (рис. 4).

Шипунский сегмент. Вулканогенно-туфогенные комплексы палеодуги в этом сегменте обнажены в пределах п-ова Шипунский и мыса Налычева (рис. 1) и представлены туфогенно-осадочными и вулканогенными образованиями шипунской, налычевской толщ, туфогенными и вулканогенными образованиями кроноцкой серии (Геологическая..., 1992; Цуканов, 2018; Цуканов и др., 2009, 2024), слагая относительный автохтон. Непосредственные контакты между образованиями шипунской и налычевской толщами отсутствуют.

Шипунская толща в южной части п-ова Шипунский представлена чередованием туфов различного гранулометрического размера и состава, переслаивающихся с потоками андезитов, и базальтов, дацитов. Базальты толщи по содержанию титана являются низкотитанистыми ($0.7\text{--}1.1 \% \text{TiO}_2$), низкокалийевыми ($\text{K}_2\text{O}=0.2\text{--}0.8 \%$). На спайдерграмме (рис. 2з) составы базальтов демонстрируют типичное для надсубдукционных пород распределение элементов: минимумы высокозарядных элементов (Nb, Ta, Ti, Th) и максимумы Sr, Pb. Распределение РЗЭ слабофракционированное: $((\text{La}/\text{Sm})_n=0.6\text{--}1.2, (\text{La}/\text{Yb})_n=0.6\text{--}1.8)$. Базальты толщи характеризуются значениями отношений $\text{Zr}/\text{Y}=1.9\text{--}2.7, \text{Nb}/\text{Y}=0.03\text{--}0.05, \text{Th}/\text{Yb}=0.08\text{--}0.18, \text{Ba}/\text{Th}=170\text{--}500, \text{Rb}/\text{Th}=10\text{--}40$.



Fig. 4. The ratio of ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}\text{--}{}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ (a) and ${}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}\text{--}{}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ (b) in Late Cretaceous-Early Paleogene igneous rocks of tectonostratigraphic terranes of Eastern Kamchatka. 1–7 — Kronotsky terrane (paleoarc): 1 — paleoarc base complexes, Smagin Formation (Portnyagin et al., 2008; Tsukanov, unpublished data); 2–3 — Kamchatka Mys segment (Tsukanov, 2018; Tsukanov et al., 2007): 2 — Nepropuskovy stream Formation, 3 — Stolbovsky Formation; 4–5 — Kronotsky segment, basalts (Skolotnev et al., 2008): 4 — Kamenistky Formation, 5 — Kronotsky Formation; 6–7 — Shipunsky segment, formations (Tsukanov et al., 2009; Tsukanov, 2018): 6 — Shipunsky, 7 — Nalychevsky; 8–12 — Ozernoy-Valagin segment of Achaivayam-Valaginsky terrane (paleoarc): 8–9 — Kumroch range: 8 — Khapitzkay Formation, basalts (Kovalenko et al., 2009; Sukhov et al., 2016; Tsukanov et al., 2008a); 9 — shoshonites (Kovalenko et al., 2009); 10–11 — Tumrok range: 10 — Khapitzkay Formation, basalts (Chayka et al., 2023; Koloskov et al., 2009), 11 — Andrianovsky pluton gabbro and dolerites (Chayka et al., 2023; Eskin et al., 2007; Tsukanov, Skolotnev, 2010); 12 — Valaginsky range, basalts, Poputnaya Formation (Koloskov et al., 2009). MORB-AOC — average altered MORB from Kamchatka ophiolite (Duggen et al., 2007); KMW — North Kamchatka MantleWedge (KMW); NWPS — NorthWest Pacific Sediments by (Portnyagin et al., 2015); AOC-fluid by (Ishizuka et al., 2006). Pacific and Indian fresh MORB (Class, Lehnert, 2012).

Величины изотопных отношений составляют $\epsilon\text{Nd}=10.6-10.8$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70297-0.70375$ (рис. 3), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.062-18.338$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.436-15.510$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.666-38.000$ (рис. 4).

Магматические породы налычевской толщи (мыс Налычева, Шипунский п-ов) образуют непрерывную дифференцированную серию от базальтов до дацитов. Базальты характеризуются низкими содержаниями TiO_2 (0.87–1.03 %) при сильно варьирующих концентрациях калия ($\text{K}_2\text{O}=0.14-3.7$ %). На спайдерграмме (рис. 2з) все изученные базальты имеют глубокие отрицательные аномалии ниобия и тантала, менее резкие отрицательные аномалии иттрия, титана и иногда циркония. Для всех изученных образцов налычевской толщи характерна резкая положительная аномалия стронция и они имеют повышенные концентрации крупноионных литофильных элементов. Базальты толщи характеризуются значениями отношений $(\text{La}/\text{Sm})_n=1.0-1.1$, $(\text{La}/\text{Yb})_n=1.9-2.1$, $\text{Zr}/\text{Y}=3.1-4.8$, $\text{Nb}/\text{Y}=0.07-0.12$, $\text{Th}/\text{Yb}=0.22-0.24$, $\text{Ba}/\text{Th}=200-800$, $\text{Rb}/\text{Th}=28-30$. Величины изотопных отношений составляют $\epsilon\text{Nd}=9.4-10.3$ (рис. 3), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70328-0.70375$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.115-18.180$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.436-15.469$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.626-37.760$ (рис. 4).

Среди вещественных комплексов **Озерновско-Валагинского террейна**, проанализированы комплексы Кумрочско-Озерновско-Карагинского и Валагинско-Тумрокского сегментов, которые обнажаются в пределах Восточных хребтов Камчатки и на восточном склоне Срединного хребта. Возраст пород определяется от мела до палеоцена. Они формируют сложную покровно-складчатую структуру (Аккреционная..., 1993; Государственная..., 2006а; Шапиро, Соловьев, 2009 и др.). Неоавтохтонный чехол представлен верхнеэоценовыми-миоценовыми преимущественно терригенными отложениями и плиоценовыми вулканогенно-туфогенными породами Восточно-Камчатского вулканического пояса (Государственная..., 2006а). На о. Карагинский, п-ове Озерной, хребтах Кумроч и Валагинский (рис. 1) описаны офиолитовые комплексы, образованные базальтами, серпентинитовым полимиктовым меланжем и массивами ультраосновных пород. В данной работе они не анализируются.

Вулканические породы Озерновско-Валагинского террейна по соотношению кремнезема и суммы щелочей относятся к субщелочной и щелочной сериям, по поведению железа среди них выделяются породы толеитовой и известково-щелочной петрохимических серий (Аккреционная..., 1993; Коваленко и др., 2009; Сухов и др., 2016; Цуканов, Сколотнев, 2010; Цуканов и др., 2024 и др.). Характерной особенностью вулканизма является широкое развитие пород повышенной щелочности (преимущественно

по содержанию калия) во всех рассматриваемых районах, а также пород высокой магнезиальности (пикриты, лампроитоиды) в хребтах Тумрок и Валагинский. Вариации некогерентных элементов в вулканических породах Озерновско-Валагинского террейна показаны на спайдерграммах (рис. 2 д–з). Характер распределения редких элементов (обогащение крупноионными и легкими редкоземельными элементами относительно высокозарядных и тяжелых редкоземельных, приводящие к появлению глубоких минимумов Nb, Ta, Zr, Ti и максимумов Sr, Pb) в исследованных базальтоидах калиево-натриевых (и, частично, калиевых) серий свидетельствуют о их формировании в надсубдукционной обстановке.

На о. **Карагинский** выделяется несколько структурно-вещественных комплексов поздне-мелового-раннепалеоценового возраста (Коваленко и др., 2009).

Базальты кампан-мастрихтского кремнисто-вулканогенного комплекса — низкотитанистые (до 1.05 % TiO_2), умереннокалиевые ($\text{K}_2\text{O}=0.15-0.85$ %). На спайдерграммах они демонстрируют особенности составов типичные для островодужных магм — обогащение легкими литофильными элементами и легкими редкими землями относительно высокозарядных элементов и тяжелых редких земель (рис. 2д). Распределение РЗЭ фракционированное: $(\text{La}/\text{Sm})_n=1.3-2.0$, $(\text{La}/\text{Yb})_n=2.0-4.6$. Базальты толщи характеризуются значениями отношений $\text{Zr}/\text{Y}=1.8-2.9$, $\text{Nb}/\text{Y}=0.05-0.08$, $\text{Th}/\text{Yb}=0.36-0.45$, $\text{Ba}/\text{Th}=120-800$, $\text{Rb}/\text{Th}=1.5-10.0$ при величинах отношений ϵNd от 8.4 до 9.5.

Вулканогенно-обломочный маастрихт-датский комплекс в нижней части представлен пачками туфобрекчий с обломками от базальтов до андезитов, агломератов, лапиллиевых туфов; наблюдаются базальтовые потоки с подушечной отдельностью. По содержанию калия породы комплекса принадлежат умереннокалиевой серии, а также шошонитовой.

Для изученных умереннокалиевых и шошонитовых андезитов характерны следующие значения отношений несовместимых элементов, соответственно (Коваленко и др., 2009): $(\text{La}/\text{Sm})_n=1.3$ и 3.7 , $(\text{La}/\text{Yb})_n=1.8$ и 9.7 , $\text{Nb}/\text{Y}=0.24$ и 0.16 , $\text{Th}/\text{Yb}=3.6$ и 0.4 , $\text{Ba}/\text{Th}=103$ и 650 , $\text{Rb}/\text{Th}=9$ и 18 , $\epsilon\text{Nd}=7.7$ и 6.6 при сходных $\text{Zr}/\text{Y}=3.8$.

В хребте **Кумроч** вулканогенно-осадочные образования наиболее полно представлены разрезами поздне-меловой — датской хапицкой толщей. Они согласно, но с размывом, перекрываются терригенными отложениями дроздовской толщи палеоценового возраста (Геологическая..., 2005; Государственная..., 2006). В современной структуре изученные комплексы находятся в покровных взаимоотношениях, где на вулкано-

генно-осадочные образования хапицкой толщи надвинуты серпентинизированные гипербазиты и габброиды Кротонского массива, а на востоке, юго-востоке хапицкая и дроздовская толщи надвинуты на породы ветловского террейна.

В составе хапицкой толщи хребта Кумроч выделяется три ассоциации: низко калиевая базальт-андезибазальтовая, умереннокалиевая известково-щелочная и высококалиевая шошонитовая (Аккреционная..., 1993; Коваленко и др., 2009; Сухов и др., 2016). Примечательно, что большая часть вулканических пород шошонитовой серии участвует в структуре хребта Кумроч в виде обособленных тектонических чешуй.

Для базальтов умеренно калиевой и шошонитовой серий (рис. 2е) характерны следующие индикаторные отношения несовместимых элементов, соответственно: $(La/Sm)_n = 0.8-2.3$ и $0.8-1.8$, $(La/Yb)_n = 0.8-4.4$ и $0.9-4.9$, $Zr/Y = 1.6-4.1$ и $1.5-4.5$, $Nb/Y = 0.06-0.28$ и $0.04-0.09$, $Th/Yb = 0.13-0.78$ и $0.5-1.3$, $Ba/Th = 150-600$ и $200-1600$, $Rb/Th = 4-20$ и $6-40$ при величинах изотопных отношений составляющих: $\epsilon Nd = 6.7-10.2$ и $7.7-9.6$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70310-0.70385$ и $0.70323-0.70397$ (рис. 3), $^{206}Pb/^{204}Pb = 18.048-18.694$ и $18.248-18.286$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.481-15.576$ и $15.491-15.493$, $^{208}Pb/^{204}Pb = 37.980-38.260$ и $37.871-38.063$ (рис. 4).

В хребте **Тумрок** (рис. 1) широко распространены вулканогенные и туфо-терригенные образования позднемелового-раннепалеогенового возраста. По (Аккреционная..., 1993) они расчленяются снизу вверх на пикрит-базальтовую (хребтовский комплекс), туфогенно-осадочную, базальт-андезитовую (хапицкий комплекс) и терригенную (флишоидную) толщи. Базальт-пикритовая толща пронизана комагматическими дайками, силлами и некками основного-ультраосновного состава (Селиверстов и др., 1994).

Вулканические породы хапицкой толщи хребта Тумрок представлены высококалиевыми известково-щелочными трахибазальтами и трахиандезитами (рис. 2ж).

Трахибазальты хапицкой толщи характеризуются следующими значениями отношений $(La/Sm)_n = 0.9-2.1$, $(La/Yb)_n = 1.0-2.8$, $Zr/Y = 1.3-2.4$, $Nb/Y = 0.05-0.09$, $Th/Yb = 0.15-0.30$, $Ba/Th = 600-3000$, $Rb/Th = 80-250$. Величины изотопных отношений составляют $\epsilon Nd = 8.4-14.5$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70334-0.70381$ (рис. 3), $^{206}Pb/^{204}Pb = 18.055$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.477$, $^{208}Pb/^{204}Pb = 37.785$ (рис. 4).

На **Валагинском** хребте (рис. 1) меловые — нижнепалеогеновые образования слагают мощный полифациальный разрез, представленный вулканогенными и кремнисто-туфогенными образованиями. Эффузивы кремнисто-вулканогенного комплекса (попутновский комплекс) (Аккреционная..., 1993) северной части Валагинского хребта относятся к дифференцированной серии и сложены базальтами, андезитами, реже

присутствуют трахиандезиты. Кроме этого среди блоков в меланже присутствуют афировые сильно измененные толеитовые базальты. Возраст комплекса по данным радиоляриевого анализа определяется как позднеантон-маастрихтский.

Обособленно выделяется толща лав и вариолитовых туфов ультраосновного состава (хребтовская толща). Наряду с пикритами, в составе хребтовской толщи известны лампроитоиды (Селиверстов и др., 1994), формирующие отдельные потоки, дайки и трубки взрыва, а также редкие потоки нефелиновых базальтов и карбонатитов (Геохимическая..., 1990; Селиверстов, 2009). Абсолютный возраст одной из даек лампроитоидов (K/Ar метод) равен 67 млн лет (Селиверстов, 2009).

В центральной части Валагинского хребта выделяется китильгинская толща, имеющая двучленное строение (Государственная..., 2006а). Нижняя часть толщи образована агломератовыми, псефитовыми, псаммитовыми, алевритовыми, пелитовыми туфами базальтового, андезибазальтового, андезитового состава, базальтами, андезибазальтами, реже андезитами, крайне редко кремнями, полимиктовыми и вулканомиктовыми песчаниками и алевролитами. Верхняя часть разреза отличается меньшим количеством пирокластике и, в основном сложена переслаивающимися шошонитовыми базальтами с прослоями и пачками туфов такого же состава (Федоров и др., 2013). В лавах и агломератовых туфах наблюдаются многочисленные включения габбро, габбро-пироксенитов и дунитов. Абсолютный возраст базальтов, определенный K-Ar методом, составляет 68–86 млн лет (Государственная..., 2006а).

Вулканиты попутновского комплекса (попутновская толща) представлены базальтами низкокалиевой толеитовой и умеренно калиевой известково-щелочной серий; реже отмечаются породы шошонит-латитовой серии (рис. 2з) (Геохимическая..., 1990; Колосков и др., 2009; Цуканов и др., 2024).

Умеренно калиевые базальты комплекса характеризуются следующими значениями отношений $(La/Sm)_n = 0.4-1.8$, $(La/Yb)_n = 0.5-3.4$, $Zr/Y = 1.2-2.1$, $Nb/Y = 0.06-0.11$, $Th/Yb = 0.14-0.36$, $Ba/Th = 400-4500$, $Rb/Th = 20-70$. Величины изотопных отношений составляют $\epsilon Nd = 9.7-11.2$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70367-0.70377$ (рис. 3), $^{206}Pb/^{204}Pb = 18.051$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.454$, $^{208}Pb/^{204}Pb = 37.737$ (рис. 4).

Базальты шошонитовой серии, изученные нами в составе китильгинской толщи (Федоров и др., 2013), отличаются следующими индикаторными характеристиками: $(La/Sm)_n = 1.8-2.0$, $(La/Yb)_n = 2.7-6.5$, $Zr/Y = 3.2-4.6$, $Nb/Y = 0.36-0.40$, $Th/Yb = 1.6-2.0$, $Ba/Th = 70-100$, $Rb/Th = 25-30$ при величинах изотопных отношений составляющих: $\epsilon Nd = 4.8-5.4$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70293-0.70303$ (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ МАТЕРИАЛА

Характер распределения петрогенных (низкие содержания титана) и редких элементов (обогащение LILE относительно HFSE, отчетливые Nb и Ta минимумы и Pb, Sr максимумы) в мел-палеоценовых базальтоидах Кроноцкого и Озерновско-Валагинского террейнов свидетельствуют об их формировании в надсубдукционной обстановке (рис. 2).

Согласно поликомпонентным моделям (Мартынов и др., 2010; Elliot, 2003), состав надсубдукционных магм определяется смешением следующих компонентов источника: надсубдукционной мантии, субдукционных компонентов — водного флюида или расплава, образующихся, соответственно, при низко- и высоко-температурном преобразовании океанической коры (измененные океанические базальты+осадочный чехол) или измененной океанической корой, а также корового контаминанта.

Относительный вклад этих компонентов в магмогенезис пород реконструируется, как пра-

вило, на соотношении LILE и HFSE элементов и радиогенных изотопов.

Мантийные источники. Характеристика изотопно-обедненного или обогащенного состава источника вулканических пород основывается на сопоставлении начальных $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ отношений со значениями изотопных отношений в примитивной мантии (соответственно, 0.7045 и 0.512638 (Фор, 1989) для современного состава примитивной мантии). Все вулканические породы Восточной Камчатки характеризуются положительными значениями $\epsilon\text{Nd}(T)$, что, в целом, позволяет говорить о деплетированном характере глубинных источников (рис. 3). Вместе с тем, изотопно-геохимические характеристики пород указывают, что в образовании магм могли участвовать различные по составу компоненты.

Так, по соотношению изотопов $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (рис. 5) часть базальтов Кроноцкого террейна располагается вдоль линии смешения N-MORB-подобного и обогащенного источника типа EM I (базальты каменистской свиты и кроноцкой серии Кроноцкого сегмента, толщи

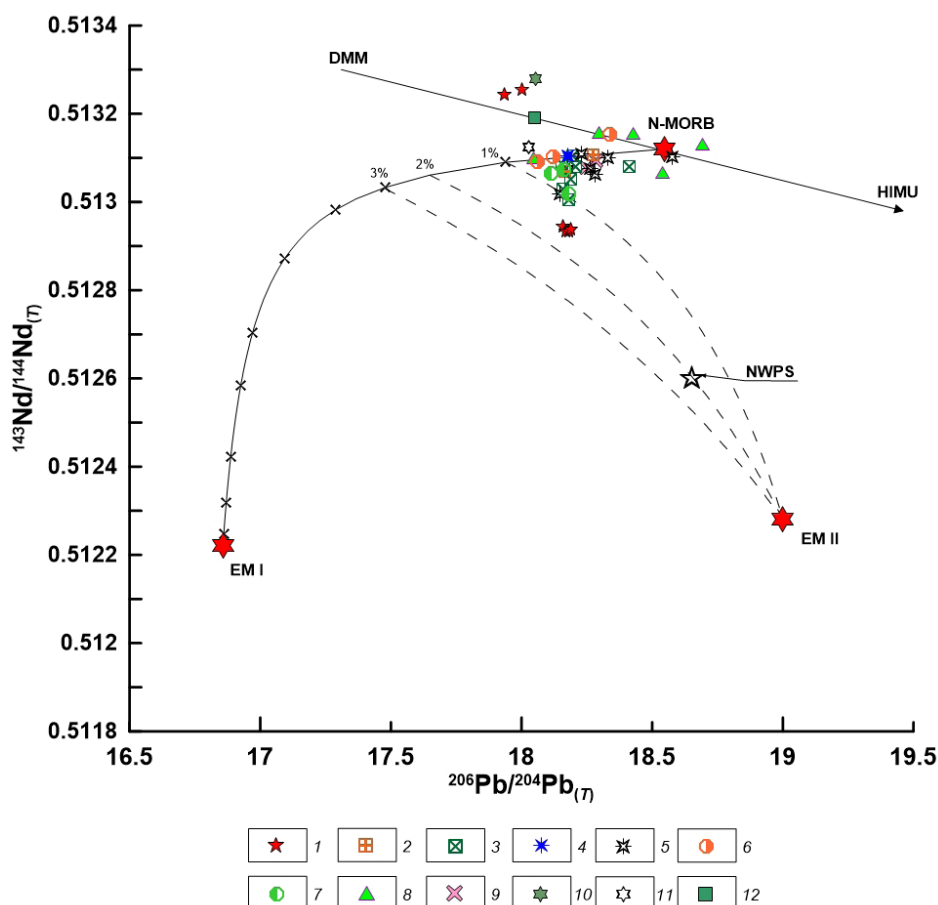


Рис. 5. Диаграмма $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для позднемеловых-палеогеновых магматических пород тектоно-стратиграфических террейнов Восточной Камчатки. Условные обозначения и расшифровка аббревиатур представлены на рис. 4. Компоненты: DMM, HIMU по (Workman, Hart, 2005), EM I, EM II по (Hart, 1988).

Fig. 5. The ratio of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ in Late Cretaceous-Paleogene igneous rocks of tectonostratigraphic terranes of Eastern Kamchatka. See Fig. 4 for notations 1–12. Components: DMM, HIMU by (Workman, Hart, 2005), EM I, EM II by (Hart, 1988).

р. Непропускная Камчатско-мысского сегмента и шипунской толщи Шипунского сегмента), тогда как породы столбовского комплекса Камчатско-мысского сегмента и нальческой свиты Шипунского сегмента располагаются вдоль трендов смещения обогащенного источника типа EM II и «гибридного» компонента, образованного MORB-подобным источником и мантийным компонентом EM I.

Соотношения изотопов $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в породах Озерновско-Валагинского террейна отличаются меньшей гетерогенностью по сравнению с вулканитами Кроноцкого террейна, хотя и здесь проявлены определенные региональные различия. Большая часть базальтов хребтов Тумрок и Валагинский тяготеют к линии смещения обогащенного источника типа EMII и «гибридного» компонента, образованного MORB-подобным источником и мантийным компонентом EM I, в то время как базальтоиды хребта Кумроч имеют более деплетированные характеристики.

Для выделения обогащенного (мантийно-плюмового) и деплетированного мантийных источников использованы межэлементные соотношения Nb, Zr, Y. Было установлено (Fitton et al., 1997), что базальты Исландии, имеющие мантийно-плюмовые изотопные характеристики, на диаграмме Nb/Y–Zr/Y занимают определенное узкое поле. Для характеристики мантийно-плюмовой компоненты было предложено использовать параметр ΔNb , который определяется 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 базальтам с плюмовой компонентой, а значения $\Delta\text{Nb} < 0$ отвечают базальтам, генерированным при частичном плавлении деплетированной верхней мантии.

На диаграмме Nb/Y–Zr/Y (Condie, 2005) (рис. 6а) фигуративные точки базальтов и андезибазальтов Кроноцкого террейна располагаются в целом ниже границы ΔNb , попадая в область состава деплетированных мантийных источников. Для базальтоидов Озерновско-Валагинского террейна наблюдается более сложная картина (рис. 6б). Так, базальты хапицкой толщи хребта Тумрок характеризуются наиболее низкими Nb/Y и Zr/Y отношениями, сопоставимым с толеитами Кроноцкого террейна. Более обогащенный состав имеют базальты о-ва Карагинский, хапицкой толщи хребта Кумроч и попутновской толщи Валагинского хребта. Трахибазальты шошонитовой серии китильгинской свиты, как и часть базальтов хребта Кумроч, характеризуются более высокими Nb/Y отношениями, располагаясь в области состава базальтов океанического дна (OFB), тогда как шошониты

хапицкой толщи хребта Кумроч отличаются более деплетированным составом.

Оценить принадлежность базальтоидов к мафическим ассоциациям, образованным при частичном плавлении истощенной верхней мантии, можно по соотношению Nb/Yb, позволяющим оценить природу глубинного источника до его контаминации субдукционной составляющей (Di Vincenzo, Rocchi, 1999), а также подчеркивающими относительно ювенильную природу источника. Так, базальты Кроноцкого террейна характеризуются низкими Nb/Yb отношениями (0.1–0.7), несколько возрастающими в базальтах тарховской свиты (до 1.8), характеризующих деплетированный мантийный источник (рис. 7). Большая часть базальтов Озерновско-Валагинского террейна характеризуется близкими Nb/Yb отношениями, составляющими (0.3–1.1), за исключением трахибазальтов китильгинской свиты, где Nb/Yb отношения составляют 4.7–5.5.

Геохимические свойства пар высокозарядных элементов Nb-Ta и Zr-Hf близки между собой, и Nb/Ta и Zr/Hf отношения в примитивной мантии и MORB (Sun, McDonough, 1989) близки к хондритовым (Nb/Ta~17.6 и Zr/Hf=36–37) (рис. 7).

В надсубдукционных вулканитах вариации Nb/Ta связаны с особенностями мантийного источника, взаимодействующего с субдукционным компонентом, в составе которого в различных пропорциях присутствуют водный флюид и расплав (Ishizuka et al., 2006). Высокие Nb/Ta отношения свидетельствуют о преобладании в субдукционном компоненте расплава, низкие — водного флюида. Базальты Восточной Камчатки, обедненные несовместимыми элементами (низкие Nb/Yb-отношения <2) как правило имеют субхондритовые Nb/Ta-отношения; значения отношений Zr/Hf в них часто связано с повышенной щелочностью. Следовательно для базальтов Восточной Камчатки можно говорить о преобладании в субдукционном компоненте водного флюида.

Субдукционные компоненты. Для оценки роли флюида, образованного в результате дегидратации измененных океанических базальтов, или расплава, образованного при плавлении осадков, использовался ряд отношений радиогенных изотопов и микроэлементов.

При реконструкции состава субдукционных компонент в качестве конечных членов использовались средний состав измененных океанических базальтов из офиолитовых комплексов Восточной Камчатки (MORB-AOC) (Duggen et al., 2007), средний состав осадочного материала Северо-Западной Пацифики (NWPS) и рассчитанный состав надсубдукционной мантии Камчатки (KMW) (Portnygin et al., 2015). Также

использовались рассчитанные составы расплава (SED расплав) и флюида (SED флюид), связанных с плавлением осадка, и флюида, образовавшегося при дегидратации измененной океанической коры (АОС флюид) (Ishizuka et al., 2006, Singer et al., 2007, Turner, Langmuir, 2024).

Отношения радиогенных изотопов $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в значительной степени контролируются субдукционным осадком, где концентрации свинца на порядок превышают их мантийные значения. В область, ограниченную компонентами NWPS–АОС флюид–MORB–АОС и KMW попадает преобладающее число рассматриваемых камчатских пород (рис. 4).

Для оценки роли расплава (SED расплав) и флюида (SED флюид), а также АОС флюида,

образовавшегося при дегидратации измененной океанической коры, использовалась диаграмма $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ – Th/Nd (рис. 8). Известно, что Th из-за высоких концентраций в океанических осадках отличается повышенным содержанием в расплаве, образованном при его плавлении (Plank, Langmuir, 1998). Th и Nd — некогерентные элементы и их отношение меняется незначительно в процессе плавления или фракционной кристаллизации (Pertermann et al., 2004). Оба эти элемента не мобильны во флюидной фазе (Johnson, Plank, 1999), при этом расплав, образованный в результате плавления осадка будет более обогащен Th, из за высокой концентрации этого элемента в плавящемся веществе. Следовательно, отношение Th/Nd может быть

Fig. 6. Nb/Y–Zr/Y in Late Cretaceous–Paleogene igneous rocks of tectonostratigraphic terranes of Eastern Kamchatka. 1–7 — Kronotsky terrane (paleoarc): 1 — paleoarc base complexes, Smagin Formation (Portnyagin et al., 2008; Tsukanov, unpublished data); 2–3 — Kamchatka Mys segment (Tsukanov, 2018; Tsukanov et al., 2007); 2 — Nepropuskovoy stream Formation, 3 — Stolbovsky Formation; 4–5 — Kronotsky segment, basalts (Skolotnev et al., 2008); 4 — Kamenistky Formation, 5 — Kronotsky Formation; 6–7 — Shipunsky segment, formations (Tsukanov, 2018; Tsukanov et al., 2009): 6 — Shipunsky, 7 — Nalychevsky; 8–14 — Ozernoy-Valagin segment of Achaivayam-Valaginsky terrane (paleoarc): 8 — Karaginsky Island, siliceous-volcanogenic complex (Kovalenko et al., 2009); 9–10 — Kumroch range: 9 — Khapitzkay Formation, basalts (Kovalenko et al., 2009; Sukhov et al., 2016; Tsukanov et al., 2008a), 10 — shoshonites (Kovalenko et al., 2009); 11–12 — Tumrok range: 11 — Khapitzkay Formation, basalts (Chayka et al., 2023; Koloskov et al., 2009), 12 — Andrianovsky pluton gabbro and dolerites (Chayka et al., 2023; Eskin et al., 2007; Tsukanov and Skolotnev, 2010); 13–14 — Valaginsky range: 13 — Poputnaya Formation, basalts (Koloskov et al., 2009), 14 — shoshonites, Kitilginskaya Formation (Fedorov et al., 2013). Fields of different types of basalts according to (Condie, 2005): N–MORB — mid-ocean ridge basalts, OIB — ocean island basalts, IAB — island arc basalts, OFB — ocean floor basalts.

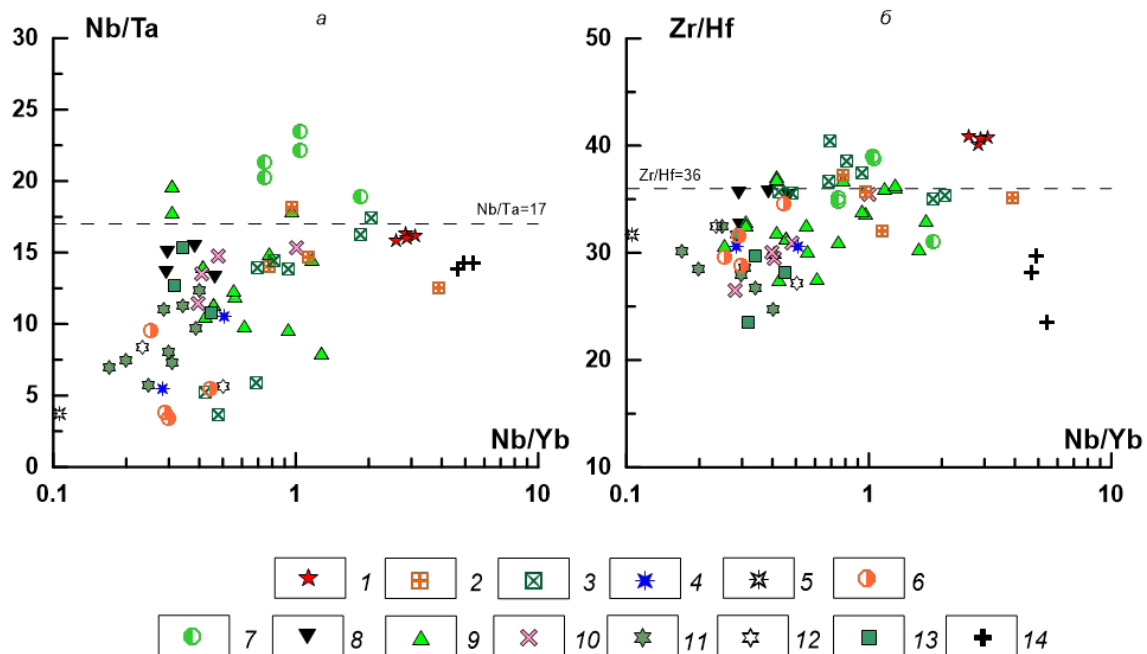


Рис. 7. Дискриминантные диаграммы Nb/Ta–Nb/Yb (a) Zr/Hf–Nb/Yb (б) для поздне меловых–палеогеновых базальтоидов тектоностратиграфических террейнов Восточной Камчатки. Условные обозначения представлены на рис. 6. Nb/Ta=17 и Zr/Hf=36 — отношения в хондрите по (Sun, McDonough, 1989).

Fig. 7. Nb/Ta–Nb/Yb (a) Zr/Hf–Nb/Yb (б) ratios in Late Cretaceous–Paleogene igneous rocks of tectonostratigraphic terranes of Eastern Kamchatka. See Fig. 6 for notations 1–14. Nb/Ta=17 and Zr/Hf=36 — chondrits ratios by (Sun, McDonough, 1989).

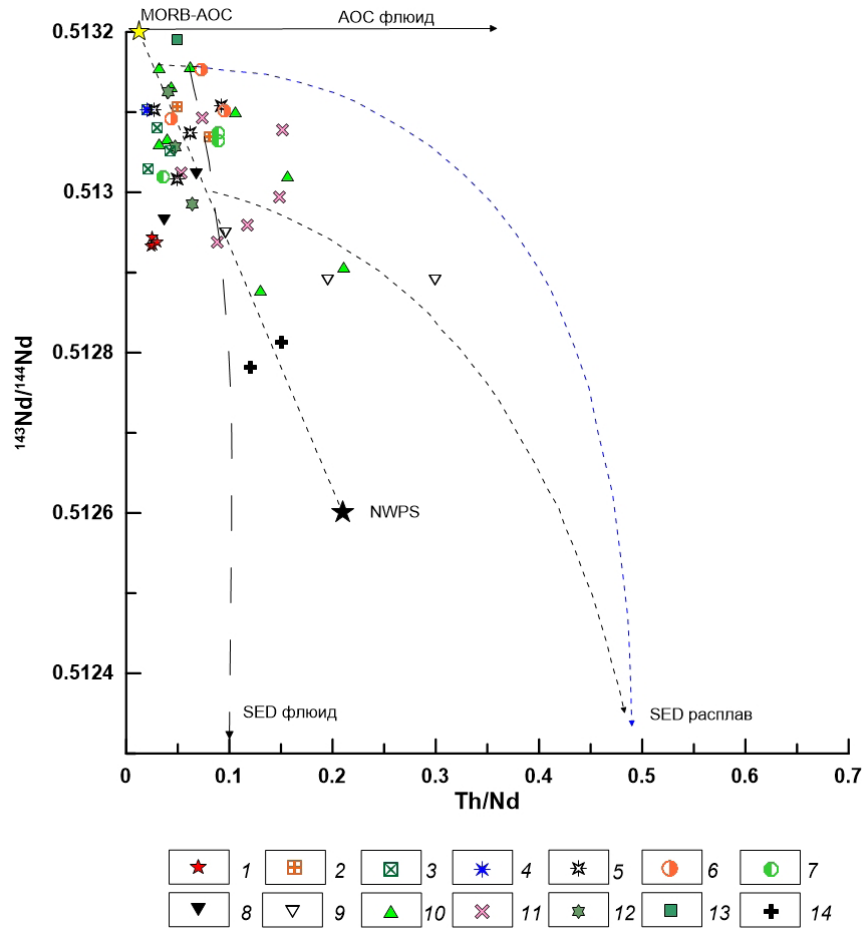


Рис. 8. Диаграмма $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Th/Nd для оценки роли субдукционных компонентов в магмогенезисе вулканических пород тектоностратиграфических террейнов Восточной Камчатки. 1–7 — Кроноцкий террейн (палеодуга): 1 — комплексы основания палеодуги, смагинская свита (неопубл. данные; Portnyagin et al., 2008); 2–3 — Камчатскомысский сегмент (Цуканов, 2018; Tsukanov et al., 2007): 2 — толща р. 1-ая Непропусксовая, 3 — столбовская серия; 4–5 — Кроноцкий сегмент (Сколотнев и др., 2008): 4 — каменистская свита, базальты, 5 — кроноцкая серия, базальты; 6–7 — Шипунский сегмент, толщи (Цуканов, 2018; Цуканов и др., 2009): 6 — шипунская, 7 — налычевская; 8–14 — Озерновско-Валагинский сегмент Ачайваям-Валагинской террейна (палеодуги): 8–9 — о-в Карагинский, комплексы (Коваленко и др., 2009): 8 — кремнисто-вулканогенный, базальты, 9 — вулканогенно-обломочный, андезиты; 10–11 — хребет Кумроч: 10 — базальты, хапицкая свита (Коваленко и др., 2009; Сухов и др., 2016; Цуканов и др., 2009), 11 — шошониты (Коваленко и др., 2009); 12 — хребет Тумрок, базальты, хапицкая свита (Колосков и др., 2009; Chayka et al., 2023); 13–14 — Валагинский хребет: 13 — базальты, попутновский комплекс (Колосков и др., 2009), 14 — шошониты, китильгинская свита (Федоров и др., 2013). Показаны рассчитанные линии смешения состава измененных базальтов Восточно-Камчатских офиолитов по (MORB-AOC (Duggen et al., 2007)) со средним составом осадков северо-западной части Тихого океана (NWPS (Portnyagin et al., 2015)), с расплавом (SED-расплав) и флюидной фазой (SED-флюид), образовавшихся, соответственно, в результате плавления и дегидратации субдукционного осадка, по (Мартынов и др., 2010).

Fig. 8. The $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Th/Nd diagram for evaluating the contribution of subduction and crustal components in genesis of Late Cretaceous-Early Paleogene igneous rocks of tectonostratigraphic terranes of Eastern Kamchatka. 1–7 — Kronotsky terrane (paleoarc): 1 — paleoarc base complexes, Smagin Formation (unpublished data; Portnyagin et al., 2008); 2–3 — Kamchatka Mys segment (Tsukanov, 2018; Tsukanov et al., 2007): 2 — Nepropuskovy stream Formation, 3 — Stolbovsky Formation; 4–5 — Kronotsky segment, basalts (Skolotnev et al., 2008): 4 — Kamenistky Formation, 5 — Kronotsky Formation; 6–7 — Shipunsky segment, formations (Tsukanov et al., 2009; Tsukanov, 2018): 6 — Shipunsky, 7 — Nalychevsky; 8–14 — Ozernoy-Valagin segment of Achaivayam-Valaginsky terrane (paleoarc): 8–9 — Karaginsky isl., complexes (Kovalenko et al., 2009): 8 — siliceous-volcanogenic, 9 — volcanogenic-clastic; 10–11 — Kumroch range: 10 — Khapitzkay Formation, basalts (Kovalenko et al., 2009; Sukhov et al., 2016; Tsukanov et al., 2008a); 11 — shoshonites (Kovalenko et al., 2009); 12 — Tumrok range, Khapitzkay Formation, basalts (Chayka et al., 2023; Koloskov et al., 2009); 13–14 — Valaginsky range: 13 — Poputnaya Formation, basalts (Koloskov et al., 2009); 14 — shoshonites, Kitilginskaya Formation (Fedorov et al., 2013). The calculated mixing lines for altered Kamchatka ophiolite basalts (MORB-AOC) according to (Duggen et al., 2007) and average composition of the Northwest Pacific sediments (Portnyagin et al., 2015), and melt (SED-melt) and fluid phase (SED-fluid) formed, respectively, by melting and dehydration of subducted sediments according to (Martynov et al., 2010).

использовано в качестве дискриминанта при оценке роли флюида или расплава в магмообразовании (Plank, Langmuir, 1998).

Точки составов базальтов Кроноцкого террейна преимущественно располагаются вблизи линии смешения составов водного флюида, образовавшегося при дегидратации измененной океанической коры (MORB-АОС) и SED флюида, за исключением базальтов Шипунского сегмента. Для базальтов Озерновско-Валагинского сегмента Ачайваям-Валагинского террейна наблюдается более сложная картина. Так, базальты хапицкого комплекса хребта Тумрок, попутновского и китильгинского Валагинского хребта, как и базальты кремнисто-вулканогенного комплекса о. Карагинский, также ложатся на линию смешения составов водного флюида и субдукционного осадка. В тоже время для базальтов и трахибазальтов хребта Кумроч, вулканогенно-обломочного комплекса о. Карагинский и трахибазальтов китильгинской свиты Валагинского хребта, характерно смещение фигуративных точек в область повышенных отношений Th/Nd при близких значениях $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, что свидетельствует об участии в магмогенезисе и высокотемпературного осадочного компонента — расплава или надкритического флюида.

Также, для выяснения роли SED-флюида и SED-расплава, участвующих в процессе магмогенерации, был использован ряд диаграмм (рис. 9). На дискриминантной диаграмме Th/Yb-Ta/Yb (рис. 9a) базальты Кроноцкого террейна (за исключением базальтов Шипунского сегмента), отличаясь низкими Th/Yb и Ta/Yb отношениями, располагаются вдоль поля базальтов N-MORB — OIB. Напротив, точки составов базальтов Озерновско-Валагинского террейна смещены в область пород, формирующихся за счет мантийных источников обогащенных субдукционным компонентом.

На диаграмме Yb-Th (рис. 9б) базальты Камчатскомысского и Кроноцкого сегментов Кроноцкого террейна, как и большая часть Озерновско-Валагинского, ложатся на крутой тренд соотношения элементов, отражая низкотемпературную флюидную природу субдукционного компонента. Для базальтов хребта Кумроч характерно смещение фигуративных точек в область повышенных значений Th, что свидетельствует об участии в магмогенезисе и высокотемпературного осадочного компонента — расплава.

Аналогичное распределение надсубдукционных компонент в генезисе базальтов Шипунского сегмента Кроноцкой палеодуги, базальтов и трахибазальтов хапицкого комплекса хребта Кумроч и трахибазальтов китильгинской свиты Валагинского хребта, подтверждается их меж-

элементными отношениями на диаграммах Ba/Th-Th/Yb и Rb/Th-Th/Yb (рис. 9в, 9г), на которых отражается существенная роль высокотемпературного осадочного компонента. Подобные соотношения редких элементов, в целом, характерны в большей степени для вулканитов тыловых зон островных дуг (Мартынов и др., 2010).

Анализ построенных диаграмм показывает, что, образцы большинства проанализированных базальтоидов ложатся на линию смешения состава водного флюида, образовавшегося при дегидратации измененной океанической коры и субдукционного осадка (SED флюид), что согласуется с многочисленными свидетельствами преимущественно флюидной природы субдукционного компонента в большинстве островодужных систем (Ishizuka et al., 2006; Singer et al., 2007; Turner, Langmuir, 2024). В свою очередь, присутствие высокотемпературного осадочного расплава в магмогенезисе базальтоидов Шипунского сегмента, базальтов и трахибазальтов хапицкого комплекса хребта Кумроч и трахибазальтов китильгинской свиты Валагинского хребта, требует объяснения.

Предположению (Цуканов и др., 2009), что базальты Шипунского сегмента могли формироваться в тыловой области позднемиоценовой палеодуги, противоречит структурная позиция этих вулканических комплексов, которые, как было показано ранее (Цуканов, 2018), совместно с Камчатскомысским и Кроноцким сегментами формировались во фронтальной зоне Кроноцкой палеодуги. Вместе с тем, присутствие геохимических признаков влияния высокотемпературного осадочного компонента на происхождение базальтов Шипунского сегмента может свидетельствовать о сравнительно высокой температуре поверхности субдуцирующей океанической плиты ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$), что, в нашем случае — о более крутом угле наклона плиты в Шипунском сегменте.

Что касается кампан-маастрихтских вулканических образований Восточно-Камчатских хребтов, то допуская предположение (Чехович, Сухов, 2009) о развитии на начальном этапе Озерновско-Валагинской и Кроноцкой палеодуг как единой структуры, можно говорить, что они могут рассматриваться в составе тыловой области Кроноцкой палеодуги.

ВЫВОДЫ

Анализ вулканических комплексов Кроноцкого террейна (палеодуги) показывает гетерогенность их составов вдоль палеодуги. В северных сегментах для меловых комплексов характерны вулканиты низкокальциевой толеитовой серии, а в южном сегменте преимущественно развиты

породы известково-щелочной серии. Более поздний эоценовый вулканизм представлен относительно однородными по химическому составу вулканическими породами, относящимися, преимущественно, к толеитовой серии островных дуг.

Состав вулканитов Озерновско-Валагинского террейна (палеодуги) более разнообразен.

Так, на о. Карагинский распространены вулканиты умеренно-калиевой известково-щелочной и шошонитовой серий; на п-ове Озерной преимущественно развиты низкокалиевые базальты толеитовой серии. Среди пород хребт Кумроч выделяется три ассоциации: низкокалиевая базальт-андезибазальтовая, среднекалиевая известково-щелочная и высококалиевая шошо-

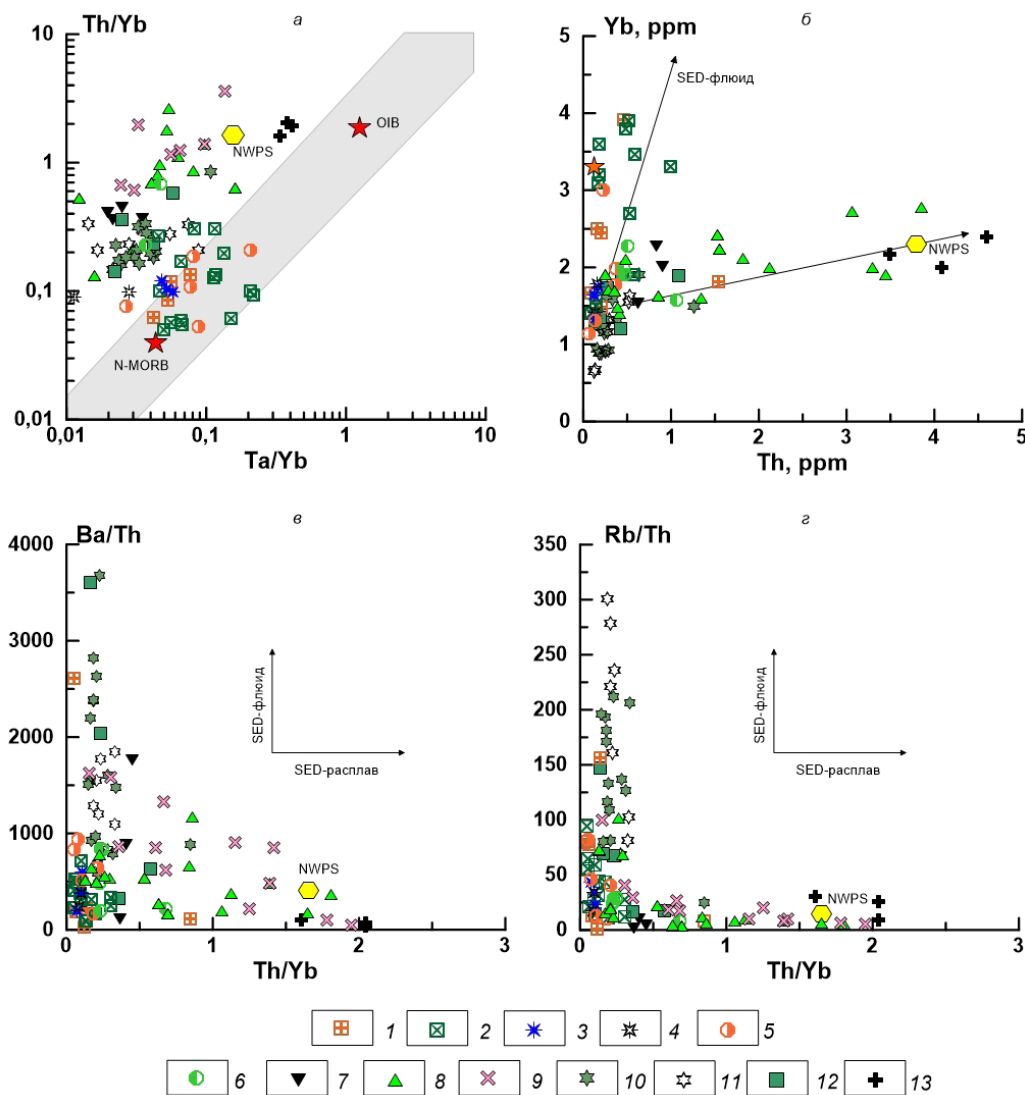


Рис. 9. Диаграммы Th/Yb–Ta/Yb (a) (Pearce, 1982), Yb–Yb (б) (Мартынов, 2013), Ba/Th–Th/Yb (e), Rb/Th–Th/Yb (z) для для позднемиоценовых-палеогеновых базальтоидов тектоностратиграфических террейнов Восточной Камчатки. 1–6 — Кроноцкий террейн (палеодуга): 1–2 — Камчатскомысский сегмент (Цуканов, 2018; Tsukanov et al., 2007): 1 — толща р. 1-ая Непропускная, 2 — столбовская серия; 3–4 — Кроноцкий сегмент (Сколотнев и др., 2008): 3 — каменистская свита, базальты, 4 — кроноцкая серия, базальты; 5–6 — Шипунский сегмент, толщи (Цуканов, 2018; Цуканов и др., 2009): 5 — шипунская, 6 — нальчевская; 7–13 — Озерновско-Валагинский сегмент Ачайваям-Валагинской террейна (палеодуги): 7 — о. Карагинский, кремнисто-вулканогенный комплекс (Коваленко и др., 2009); 8–9 — хребт Кумроч: 8 — базальты, хапицкая свита (Коваленко и др., 2009; Сухов и др., 2016; Цуканов и др., 2009), 9 — шошониты (Коваленко и др., 2009); 10–11 — хребт Тумрок: 10 — базальты, хапицкая свита (Колосков и др., 2009; Чайка et al., 2023), 11 — габбро и долериты Андриановского массива (Ескин и др., 2007; Цуканов, Сколотнев, 2010; Чайка et al., 2023); 12–13 — Валагинский хребт: 12 — базальты, попутновский комплекс (Колосков и др., 2009), 13 — шошониты, кительгинская свита (Федоров и др., 2013). Составы N-MORB и OIB по (Sun, McDonough, 1989); NWPS — средний состав осадков Северо-Западной Пацифики по (Portnyagin et al., 2015). На диаграмме Yb–Th показаны рассчитанные тренды состава флюидной фазы и расплава, формирующихся соответственно при дегидратации и плавлении осадочного материала.

Fig. 9. Th/Yb-Ta/Yb (a) (Pearce, 1982), Yb-Yb (б) (Мартынов, 2013), Ba/Th-Th/Yb (в), Rb/Th-Th/Yb (г) diagrams for Late Cretaceous-Paleogene igneous rocks of tectonostratigraphic terranes of Eastern Kamchatka. 1–6 — Kronotsky terrane (paleoarc): 1–2 — Kamchatka Mys segment (Tsukanov, 2018; Tsukanov et al., 2007); 1 — Nepropuskovy stream Formation, 2 — Stolbovsky Formation; 3–4 — Kronotsky segment, basalts (Skolotnev et al., 2008); 3 — Kamenistky Formation, 4 — Kronotsky Formation; 5–6 — Shipunsky segment, formations (Tsukanov et al., 2009; Tsukanov, 2018); 5 — Shipunsky, 6 — Nalychevsky; 7–13 — Ozernoy-Valagin segment of Achaivayam-Valaginsky terrane (paleoarc): 7 — Karaginsky Island, siliceous-volcanogenic complex (Kovalenko et al., 2009); 8–9 — Kumroch range: 8 — Khapitzkay Formation, basalts (Kovalenko et al., 2009; Sukhov et al., 2016; Tsukanov et al., 2008a); 9 — shoshonites (Kovalenko et al., 2009); 10–11 — Tumrok range: 10 — Khapitzkay Formation, basalts (Chayka et al., 2023; Koloskov et al., 2009), 11 — Andrianovsky pluton gabbro and dolerites (Chayka et al., 2023; Eskin et al., 2007; Tsukanov, Skolotnev, 2010); 12–13 — Valaginsky range: 12 — Poputnaya Formation, basalts (Koloskov et al., 2009); 13 — shoshonites, Kitilginskaya Formation (Fedorov et al., 2013). Components: N-MORB and OIB by (Sun, McDonough, 1989); NWPS — NorthWest Pacific Sediments by (Portnyagin et al., 2015). Calculated trends in the composition of the fluid phase and melt, formed during dehydration and melting of sedimentary material, respectively.

нитовая. Вулканические породы хребта Тумрок образуют две петрохимические ассоциации: низкокалиевых пикритов в составе хребтовской толщи и высококалиевых трахибазальтов-трахиандезитов в составе хапицкой толщи; в хребте Валагинский — низкокалиевая толеитовая, умеренно-калиевая известково-щелочная и шошонит-латитовая серии в составе попутновского комплекса, а также пикриты и лампроитоиды в составе хребтовской толщи.

Характер поведения флюидномобильных элементов свидетельствует об участии в разной степени флюидов/расплавов в процессе магмогенерации, а так же позволяет говорить в целом, о деплетированной природе глубинных источников, вместе с тем отражая, что в образовании магм участвовали различные по составу компоненты — надслэбовая, OIB и N-MORB, или их соотношения.

Проведенный анализ изотопно-геохимических особенностей состава вещественных комплексов палеодуг Восточной Камчатки не противоречит предположению (Чехович, Сухов, 2009) о развитии на начальном этапе Озерновско-Валагинской и Кронотской палеодуг как единой структуры.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам за тщательный анализ материалов статьи и сделанные замечания, учет которых, безусловно, способствовал улучшению работы. Авторы так же благодарны редактору за тщательное редактирование статьи.

Исследования выполнены за счет госубсидий по темам № FMMG-2023-0010 (Геологический институт РАН), № FMWE-2024-0018 (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН) и при финансовой поддержке РНФ, проект № 22-17-00033.

Список литературы [References]

Аккреционная тектоника Восточной Камчатки / Отв. ред. Пушаровский Ю.М. М.: Наука, 1993. 272 с. [Accretionary tectonic of Eastern Kamchatka /

Yu.M. Pushcharovsky (ed.). Moscow: Nauka, 1993. 272 p. (in Russian)].

Батанова В.Г., Лясковская З.Е., Савельева Г.Н., Соболев А.В. Перидотиты п-ова Камчатский Мыс: свидетельство плавления океанической мантии вблизи горячей точки // Геология и геофизика, 2014. Т. 55. № 12. С. 1748–1758 [Batanova V.G., Lyaskovskaya Z.E., Savelyeva G.N., Sobolev A.V. Peridotites from the Kamchatsky Mys: evidence of oceanic mantle melting near a hotspot // Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55. № 12. P. 1395–1403. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.11.004>].

Геологическая карта м-ба 1: 200 000. Листы N–57–XXII, XXVIII, XXIX. Объяснительная записка. М.: Недра, 1992. 180 с. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Sheets N–57–XXII, XXVIII, XXIX. Moscow: Nedra, 1992. 180 p. (in Russian)].

Геологическая карта и карта полезных ископаемых Камчатской области и Корякского автономного округа. Масштаб 1:1 500 000 / Гл. редакторы: Литвинов А.Ф., Марковский Б.А., Зайцев В.П. СПб.: ВСЕГЕИ, 2005 [Geological map and map of mineral resources of the Kamchatka region and Koryak Autonomous Okrug. Scale 1:1 500 000. / Eds: Litvinov A.F., Markovsky B.A., Zaitsev V.P. Saint Petersburg: VSEGEI, 2005 (in Russian)].

Геохимическая типизация магматических и метаморфических пород Камчатки / Отв. ред. А.П. Кривенко. Новосибирск: Ин-т геологии и геофизики СОАН СССР, 1990. 259 с. [Geochemical typification of igneous and metamorphic rocks of Kamchatka / Krivenko A.P. (ed.). Novosibirsk: Institute of Geology and Geophysics Siberian Branch of USSR, 1990. 259 p. (in Russian)].

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Лист N–57. Масштаб 1:1 000 000 / Под ред. А.Ф. Литвинова, Б.А. Марковского СПб.: ВСЕГЕИ, 2006а [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000. Sheet N–57. Saint Petersburg: VSEGEI, 2006а (in Russian)].

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Листы N–57–XII, XVIII, N–58–VII. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006б. 223 с. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Sheets N–57–XII, XVIII, N–58–VII. Saint Petersburg: VSEGEI, 2006б. 223 p. (in Russian)].

- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Листы О-58-XXVI, XXXI, XXXII. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 267 с. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Sheets O-58-XXVI, XXXI, XXXII. Saint Petersburg: VSEGEI, 2007. 267 p. (in Russian)].
- Ескин А.Е., Сколотнев С.Г., Цуканов Н.В.* Новые данные о составе и строении плутонических комплексов хребта Тумрок (Восточная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. № 9. С. 61–72 [*Eskin A.E., Skolotnev S.G., Tsukanov N.V.* The new data on composition and structure of Kumroch plutonic complexes (Eastern Kamchatka) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2007. № 1 (9). P. 61–72 (in Russian)].
- Коваленко Д.В.* Модель тектонической аккреции островодужных террейнов Камчатки и юга Корякии // Геотектоника. 2001. № 5. С. 76–92 [*Kovalenko D.V.* Model of tectonic accretion of Kamchatka and Koryak island arc terranes // Geotektonika. 2005. № 5. P. 76–92 (in Russian)].
- Коваленко Д.В., Колосков А.В., Цуканов Н.В., Федоров П.И.* Геодинамические условия формирования и магматические источники позднемеловых-раннепалеогеновых комплексов Северной Камчатки // Геохимия. 2009. № 4. С. 348–377 [*Kovalenko D.V., Koloskov A.V., Tsukanov N.V., Fedorov P.I.* Geodynamic settings and magma sources of the Late Cretaceous-Early Paleocene magmatic complexes of Northern Kamchatka // Geochemistry International. 2009. V. 47. № 4. С. 329–357. <https://doi.org/10.1134/S0016702909040028>].
- Колосков А.В., Флеров Г.Б., Коваленко Д.В.* Позднемеловые-палеоценовые магматические комплексы Центральной Камчатки: геологическое положение, особенности вещественного состава // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 4. С. 16–34 [*Koloskov A.V., Flerov G.B., Kovalenko D.V.* Late Cretaceous-Paleocene magmatic complexes of Central Kamchatka, magmatic sources, and geodynamic conditions of their formation // Russian Journal of Pacific Geology. 2009. V. 28. № 4. P. 16–34. <https://doi.org/10.1134/S1819714009040022>].
- Кравченко-Бережной И.Р.* Геологическое положение магматических комплексов западного обрамления Командорской котловины / Дисс... кандидата геолого-минералогических наук. Москва. Ин-т Литосферы АН СССР, 1989. 270 с. [*Kravchenko-Berezhnoi I.R.* Geological position of igneous complexes of the western frame of the Commander Basin / Candidate's Dissertation in Geology and Mineralogy. Moscow: Inst. Litospere Akademii. Nauk SSSR, 1989 (in Russian)].
- Левашова Н.М., Шапиро М.Н., Беньямовский В.Н., Баженов М.Л.* Реконструкция тектонической эволюции Кроноцкой островной дуги (Камчатка) по палеомагнитным и геологическим данным // Геотектоника. 2000. № 2. С. 65–84 [*Levashova N.M., Shapiro M.N., Ben'yamovskii V.N., Bazhenov M.L.* Reconstruction of the tectonic evolution of the Kronotsky island arc (Kamchatka) based on paleomagnetic and geological data // Geotektonika. 2000. № 2. С. 65–84 (in Russian)].
- Мартынов Ю.А., Ханчук А.И., Кимура Д.И. и др.* Геохимия и петрогенезис четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Петрология. 2010. Т. 18. № 5. С. 512–535 [*Martynov Y.A., Khanchuk A.I., Kimura J.-I. et al.* Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks in the Kuril island arc // Petrology. 2010. V. 18. № 5. P. 489–513. <https://doi.org/10.1134/S0869591110050048>].
- Портнягин М.В., Савельев Д.П., Хёрнле К.* Плюмовая ассоциация меловых океанических базальтов Восточной Камчатки: особенности состава шпинели и родоначальных магм // Петрология. 2005. Т. 13. № 6. С. 626–645 [*Portnyagin M.V., Savel'ev D.P., Hoernle K.* Plume-related association of Cretaceous oceanic basalts of Eastern Kamchatka: compositions of spinel and parental magmas // Petrology. 2005. V. 13. № 6. P. 571–578].
- Селиверстов В.А.* Термобарофильные минеральные парагенезисы алмазоносного щелочно-ультраосновного вулканического комплекса Восточной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 10–30 [*Seliverstov V.A.* Thermobarophile mineral parageneses of diamondiferous alkaline-ultrabasic volcanic complex of East Kamchatka // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2009. № 1 (13). P. 20–34 (in Russian)].
- Селиверстов В.А., Колосков А.В., Чубаров В.М.* Лампроитоподобные калиевые щелочно-ультраосновные породы Валагинского хребта, Восточная Камчатка // Петрология. 1994. Т. 2. № 2. С. 197–213 [*Seliverstov V.A., Koloskov A.V., Chubarov V.M.* Lamproite-like potassic alkaline-ultrabasic rocks of the Valaginsky Range, East Kamchatka // Petrology. 1994. V. 2. P. 197–213 (in Russian)].
- Сколотнев С.Г., Цуканов Н.В., Савельев Д.П., Федорчук А.В.* О гетерогенности составов островодужных образований Кроноцкого и Камчатско-мысского сегментов Кроноцкой палеодуги (Камчатка) // Доклады АН. 2008. Т. 418. № 2. С. 232–236 [*Skolotnev S.G., Tsukanov N.V., Saveliev D.P., Fedorchuk A.V.* On the heterogeneity of the compositions of island-arc formations of the Kronotsky and Kamchatskomysky segments of the Kronotsky paleoarc (Kamchatka) // Doklady Akademii nauk. 2008. V. 418. № 2. P. 232–236 (in Russian)].
- Сухов А.Н., Богданов Н.А., Чехович В.Д.* Геодинамика и палеогеография Северо-западного обрамления Тихого океана в позднем мелу // Геотектоника. 2004. № 1. С. 73–86 [*Sukhov A.N., Bogdanov N.A., Chekhovich V.D.* Geodynamic and paleogeography North-West Pacific margin in Late Cretaceous // Geotektonika. 2004. № 1. P. 76–92 (in Russian)].
- Сухов А.Н., Цуканов Н.В., Беляцкий Б.В., Руквишников Д.Д.* Вулканические комплексы тыловой части позднемеловой Ачайвьям-Валагинской палеодуги в структуре хребта Кумроч (Восточная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4. Вып. 32. С. 20–34 [*Sukhov A.N., Tsukanov N.V., Belyatsky B.V., Rukavishnikova D.D.* Back arc volcanic complexes of Late Mesozoic Achayvayam-Valagin paleoarc in the Kumroch range structure (Eastern Kamchatka) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2016. № 4 (32). P. 20–34 (in Russian)].
- Федоров П.И., Шанцер А.Е., Флеров Г.Б. и др.* О соотношении кирганикского и китильгинского

- вулканоплутонических комплексов Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. № 21. С. 16–24 [Fedorov P.I., Shantser A.E., Flerov G.B. et al. Relations between the Kirganik and Kitilgin volcanoplutonic complexes in Kamchatka // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2013. № 1 (21). P. 16–24 (in Russian)].
- Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с. [Faure G. Principles of isotope geology. Moscow: Mir, 1989. 590 p.].
- Хубуная С.А. Высокоглиноземистая плагиотолеитовая формация островных дуг. М.: Наука, 1987. 167 с. [Khubunya S.A. High-alumina plagiotoleite formation of island arcs. Moscow: Nauka, 1987. 167 p. (in Russian)].
- Цуканов Н.В. Позднемеловой-эоценовый вулканизм Кроноцкой палеодуги (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 2. Вып. 38. С. 5–21. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-2-38-5-21> [Tsukanov N.V. Upper Cretaceous-Eocene volcanism of the Kronotskiy paleoarc (Kamchatka) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2018. № 2. (38). P. 5–21 (in Russian)].
- Цуканов Н.В., Сколотнев С.Г. Новые данные по изотопному составу магматических комплексов палеодуг Восточной Камчатки // Доклады АН. 2010. Т. 434. № 5. С. 656–660 [Tsukanov N.V., Skolotnev S.G. New data on the isotopic composition of igneous complexes from Eastern Kamchatka paleo- arcs // Doklady Akademii nauk. 2010. V. 434. № 2. P. 1306–1310 (in Russian)].
- Цуканов Н.В., Федоров П.И. Вещественные комплексы палеоокеаноморских бассейнов Олюторско-Камчатского региона (особенности строения, состава и геодинамика // Океанология. 2023. Т. 63. № 3. С. 447–466. <https://doi.org/10.31857/S0030157423030140> [Tsukanov N.V., Fedorov P.I. Complexes of Marginal Sea Paleobasins of the Olyutorka-Kamchatka Region (Structure, Composition and Geodynamics) // Oceanology. 2023. V. 58. № 1. P. 447–466. <https://doi.org/10.1134/S0001437023030141>].
- Цуканов Н.В., Сколотнев С.Г., Савельев Д.П. Новые данные о составе и строении вулканических комплексов мыса Налычева и полуострова Шипунский (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 21–30 [Tsukanov N.V., Skolotnev S.G., Savelyev D.P. New Evidence for the Composition and Structure of Volcanic Complexes on Cape Nalycheva and the Shipunskii Peninsula, Kamchatka // Journal Volcanology and Seismology. 2009. № 3. P. 18–26. <https://doi.org/10.1134/S0742046309010023>].
- Цуканов Н.В., Федоров П.И., Коваленко Д.В. Позднемеловые-раннепалеогеновые вулканические породы Восточной Камчатки (особенности состава и изотопно-геохимическая гетерогенность) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2024. № 2. Вып. 62. С. 79–99. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-2-62-79-99> [Tsukanov N.V., Fedorov P.I., Kovalenko D.V. Late Cretaceous-Early Paleogene volcanic rocks of Eastern Kamchatka (composition and isotopic-geochemical heterogeneity) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2024. № 2 (62). P. 79–99 (in Russian)].
- Цуканов Н.В., Фрейтаг Р., Гедике К. Новые данные о возрасте и времени эксгумации осадочных комплексов Кроноцкого террейна и Тюшевского прогиба (Восточная Камчатка) по данным трекового датирования апатита // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 5–11. <https://doi.org/10.31857/S2686739721090206> [Tsukanov N. V., Freitag R., Gaedicke C. New data on the age and exhumation time of sediment complexes of the Kronotskiy terrane and Tushevka basin (Eastern Kamchatka) based on track dating of apatite. Doklady Earth Sciences. 2021. V. 500. № 1. P. 5–11]
- Чехович В.Д., Сухов А.Н., Кононов М.В., Паланджян С.А. Геодинамика Северо-западного сектора Тихоокеанского подвижного пояса в позднемеловое-раннепалеогеновое время // Геотектоника. 2009. № 4. С. 37–62 [Chekhovich V.D., Sukhov A.N., Kononov M.V., Palandzhyan S.A. Geodynamics of the Northwestern Sector of the Pacific Mobile Belt in the Late Cretaceous-Early Paleogene // Geotektonika. 2009. V. 43. № 4. P. 111–132. <https://doi.org/10.1134/S0016852109040049>].
- Шаниро М.Н., Соловьев А.В. Кинематическая модель формирования Олюторско-Камчатской складчатой области // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 8. С. 863–880 [Shapiro M.N., Solov'ev A.V. Formation of the Olyutorsky-Kamchatka fold belt: a kinematic model // Russian Geology and Geophysics. 2009. V 50. № 8. P. 668–681. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.10.006>].
- Alexeev D.V., Gaedicke Ch., Tsukanov N.V., Freitag R. Collision of the Kronotskiy arc at the NE Eurasia margin and structural evolution of the Kamchatka-Aleutian junction // International Journal of Earth Sciences (Geol. Rundsch.). 2006. V. 95. № 6. P. 977–993. <https://doi.org/10.1007/s00531-006-0080-z>
- Chayka I.F., Baykov N.I., Kamenetsky V.S. et al. Volcano-Plutonic Complex of the Tumrok Range (Eastern Kamchatka): An Example of the Ural-Alaskan Type Intrusion and Related Volcanic Series // Minerals. 2023. № 13. P. 126. <https://doi.org/10.3390/min13010126>
- Class C., Lehnert K. PetDB Expert MORB (Mid-Ocean Ridge Basalt) Compilation // Earth Chem Library. 2012. <http://dx.doi.org/10.1594/IEDA/100060>
- Condie K. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. V. 79. № 2. P. 491–504. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.014>
- Di Vincenzo G., Rocchi S. Origin and interaction of mafic and felsic magmas in an evolving late orogenic setting: the Early Paleozoic Terra Nova Intrusive Complex, Antarctica // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1999. V. 137. № 1. P. 15–35. <https://doi.org/10.1007/s004100050579>
- Duggen S., Portnyagin M., Baker J. et al. Drastic shift in lava geochemistry in the volcanic-front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2007. V. 71. P. 452–480. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.09.018>
- Elliott T. Tracers of the Slab. In: Inside the Subduction Factory. Geophysical Monograph. 2003. V. 138. P. 23–45. <https://doi.org/10.1029/138GM03>
- Fitton J.G., Saunders A.D., Norry M.J. et al. Thermal and chemical structure of the Iceland plume // Earth and

- Planetary Science Letters. 1997. V. 153. P. 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00170-2)
- Hart S.R. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1988. V. 90. P. 273–296. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90131-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90131-8)
- Ishizuka O., Kimura J.-I., Li Y.B., Stern R.J. 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>
- Johnson M.C., Plank T. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments // *Geochemistry. Geophysics. Geosystem.* 1999. V. 13. <https://doi.org/10.1029/999GC000014>
- Pertermann M., Hirschmann M.M., Hametner K. et al. Experimental determination of trace element partitioning between garnet and silicic liquid during anhydrous partial melting of MORB-like eclogite // *Geochemistry. Geophysics. Geosystems.* 2004. V. 5. № 5. <https://doi.org/10.1029/2003GC000638>
- Plank T., Langmuir C.H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle // *Chemical Geology*. 1998. V. 145. P. 325–394. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00150-2)
- Portnyagin M., Savelyev D., Hoernle K. et al. Mid-Cretaceous Hawaiian tholeiites preserved in Kamchatka // *Geology*. 2008. V. 36. № 11. P. 903–906. <https://doi.org/10.1130/G25171A.1>
- Portnyagin M., Duggen S., Hauff F. et al. Geochemistry of the Late Holocene rocks from the Tolbachik volcanic field, Kamchatka: Quantitative modelling of subduction-related open magmatic systems // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. V. 307. P. 133–155. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.08.015>
- Singer B.S., Jicha B.R., Leeman W.P. et al. Along-strike trace element and isotopic variation in Aleutian Island arc basalt: Subduction melts sediments and dehydrates serpentine // *Journal of Geophysical Research*. 2007. V. 112. № B06206. 26 p. <https://doi.org/10.1029/2006JB004897>
- 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>
- Tsukanov N.V., Kramer W., Skolotnev S.G., Luchitskaya M.V., Seifert W. Ophiolites of the Eastern Peninsulas zone (Eastern Kamchatka): Age, composition, and geodynamic diversity // *The Island Arc*. V. 16. 2007. № 3. P. 431–456. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2007.00579.x>
- Turner S.J., Langmuir C.H. An alternative to the igneous crust fluid + sediment melt paradigm for arc lava geochemistry // *Science Advances*. 2024. V. 10. 9 p. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adg6482>
- Workman R.K., Hart S.R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM) // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. V. 231. P. 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.12.005>

ISOTOPIC-GEOCHEMICAL HETEROGENEITY OF IGNEOUS ROCKS OF ISLAND-ARC TERRANES OF EASTERN KAMCHATKA

N.V. Tsukanov¹, P.I. Fedorov², D.V. Kovalenko³

¹*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia, 117997; e-mail: kambear2011@yandex.ru*

²*Geological Institute RAS, Moscow, Russia, 119017; e-mail: pi_fedorov@mail.ru*

³*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia, 119017*

Received February 25, 2025; revised April 23, 2025; accepted June 25, 2025

The differences in the material composition of rocks that make up individual volcanic fields within the Kamchatka island-arc terranes are shown. The Cretaceous rocks of the northern segments of the Kronotsky terrane are characterized by volcanics of the low-potassium tholeiitic series are characteristic, while the southern segments are characterized by rocks of the calcareous-alkaline series. Eocene volcanism is represented by relatively homogeneous volcanics of the tholeiitic series. The composition of the volcanics of the Ozernovsko-Valaginsky terrane (paleoarc) is more diverse and is distinguished by the development of rocks of high-potassium series. The isotope-geochemical analysis of basalts of the Kronotsky and Ozernovsko-Valaginsky terranes allows us to speak, in general, about the depleted nature of deep springs, at the same time reflecting that magma formation involved different components — superslab, OIB and N-MORB, or their ratios. The analysis of the behavior of fluid-mobile elements among basalts shows that their concentrations exceed those in N-MORB, indicating the participation of fluids/melts to different degrees in the magmogenesis process.

Keywords: Kamchatka, volcanism, geochemistry, isotopy, island-arc systems, geodynamics.