

УДК 552.323.5

КАЛИЕВЫЙ ЩЕЛОЧНОЙ ВУЛКАНИЗМ ВУЛКАНА АЛАИД (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА): РОЛЬ СУБДУКЦИОННОГО МЕЛАНЖА В МАГМОГЕНЕЗИСЕ¹

Ю. А. Мартынов^a, В. А. Рашидов^{b, *}, С. И. Дриль^{c, **}

^aДальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

^bИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

^cИнститут геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

*e-mail: rashidva@kscnet.ru

**e-mail: sdrii@igc.irk.ru

Поступила в редакцию 20.07.2023 г.

После доработки 20.04.2024 г.

Принята в печать 10.05.2024 г.

Представлены новые данные по содержаниям главных элементов и микроэлементов, Sr-Nd-Pb изотопов в голоценовых высококалийных основных лавах вулкана Алаид, расположенного на севере Курильской островной дуги в зоне сочленения с Камчатским вулканическим сегментом. По петрохимическим критериям выделяются две группы разновозрастных пород — Ne-нормативные шонониты и высококалийные субщелочные базальты, близкие между собой по ряду геохимических признаков. Хондрит-нормализованные спектры распределения REE показывают обогащение LREE при плоских спектрах распределения HREE, отсутствие Eu- и Ce-аномалий, а нормализованные к MORB концентрации некогерентных элементов — обогащение LILE и хорошо выраженную негативную Ta-Nb-Ti аномалию, типичную для надсубдукционных вулканитов. Высокие K_2O/Rb и Rb/Sr значения свидетельствуют о присутствии в магматическом источнике биотита и амфибола, а низкие величины Sr/Y и плоские спектры распределения средних и тяжелых лантаноидов — об отсутствии граната в реститовом парагенезисе. Существенные вариации содержаний макро- и микрокомпонентов при близкой концентрации MgO свидетельствуют о гетерогенном магматическом источнике, а с учетом линейных трендов смещения на изотопных и дискриминационных диаграммах и экспериментальных данных предполагается вовлечение в магмогенезис не только перидотитовой мантии, но и амфибол-клинопироксенового минерального парагенезиса. Анализ литературных данных показывает, что в «холодных» островных дугах проявления калиевого щелочного магматизма, часто, если не во всех случаях, связано с зонами локального растяжения. Поскольку такие зоны связывают с адиабатическим подъемом горячей и пластичной астеносферы, можно предполагать вовлечение в плавление субдукционного меланжа, образованного вдоль границы слэба и надсубдукционной мантии, состоящего из гидратированных обломков ультрабазитов и метаморфизованной океанической коры, преобразованной в амфиболсодержащие пироксениты. Такой механизм позволяет логично объяснить геохимические и изотопные особенности аномального щелочного магматизма Курильской островной дуги, связь с аномальной тектоникой ее северного сегмента. Полученные результаты могут быть важны при обсуждении генезиса калиевых щелочных магм, проявленных в субдукционных геодинамических обстановках.

Ключевые слова: вулкан Алаид, Курильские острова, калиевый щелочной вулканизм, субдукционный меланж

DOI: 10.31857/S0869590324060047 **EDN:** ACGWQO

ВВЕДЕНИЕ

Существующие кинематические и динамические модели островодужного магматизма предполагают водное плавление надсубдукционной

¹Дополнительные материалы размещены в электронном виде по doi статьи.

мантии MORB- или OIB-типов, метаморфизованной компонентами погружающейся океанической плиты — водным флюидом и/или расплавом (Gill, 1981; Stolper, Newman, 1994; Stern, Killian, 1996; Tatsumi, 2005; Kelley et al., 2010; Leeman, 2020). Особенности сейсмичности и магматизма указывают на связь термального режима надсубдукционного мантийного клина с параметрами субдукции — конфигурацией границ литосферных плит, возрастом, скоростью и углом погружения океанической литосферы (Syracuse et al., 2010; van Keken et al., 2011; Maunder et al., 2019; Leeman, 2020). Субдукционный меланж, локализованный вдоль границы взаимодействующих плит, насыщенный водой, обломками ультрабазитов, измененных океанических базальтов, терригенными осадками (Marschall, Schumacher, 2012), не принимает участие в плавлении из-за охлаждающего влияния океанической плиты. Такие представления, согласующиеся с большинством природных и экспериментальных данных, позволяют реалистично моделировать физико-химические условия генерации и эволюции расплавов (например, Арискин, Бармина, 2000; Kimura, 2017). Неопределенности возникают при интерпретации аномальных явлений (Leeman, 2020), к которым можно отнести проявления высококалийного щелочного вулканизма. В Курильской островной дуге он локально распространен на ее северном фланге и связан с активностью крупнейшего в тыловой зоне вулкана Алаид (о. Атласова) (Мартынов, Рашидов, 2022). Выполненные нами геологические, геохимические и изотопные исследования позволяют лучше понять его происхождение, магматические источники и состав первичных магм, влияние динамических факторов на зарождение и эволюцию расплавов.

КРАТКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Курильская островная дуга (рис. 1), являющаяся наименее изученной субдукционной системой северо-западной части Тихого океана (Мартынов и др., 2012), при общей протяженности ~1150 км и ширине 100–200 км отличается постоянством субдукционных параметров. При скорости конвергенции ~8.6 см/год возраст океанической коры вблизи Курило-Камчатского желоба колеблется от 90 до 118 млн лет, незначительно возрастая в южном направлении. Поверхность погружающейся Тихоокеанской океанической плиты располагается под вулканическим фронтом на глубинах 94.2 км на юге и 92 км на севере (Syracuse, Abers, 2006). Мощность коры также меняется незначительно от 28–33 км на юге до 32–36 на севере (Злобин и др., 1987). Кроме повышенной мощности, о ее континентальной природе свидетельствуют находки ксенолитов метаморфических пород

— плагиоклаз-пироксеновых гранулитов и кристаллических сланцев (Подводный ..., 1992).

Курило-Камчатский глубоководный желоб заполнен океаническими осадками с примесью континентального (17–80 об. %) и кремнистого биогенного материала (~9 об. %), а также вулканического пепла (первые об. %) и небольшого количества карбонатов. Количество терригенных осадков незначительно увеличивается в южном направлении (Ishikawa, Tera, 1997; Dreyer et al., 2010; Li et al., 2023a, 2023b).

При постоянстве динамических параметров субдукции продольная геохимическая зональность вулканитов дуги рассматривается как следствие гетерогенного строения надсубдукционной литосферы. Так, северные острова подстилаются мантией, деплетированной в отношении радиогенных изотопов, но обогащенной некогерентными микроэлементами, а на состав магматических пород южных островов оказывали влияние тектоно-магматические процессы, связанные с раскрытием Курильской глубоководной котловины (Мартынов и др., 2010).

К особенностям тектонической позиции вулкана Алаид (рис. 1, 2), входящего в состав наземно-подводного вулканического массива Алаид, состоящего из острова-вулкана Алаид и подводного

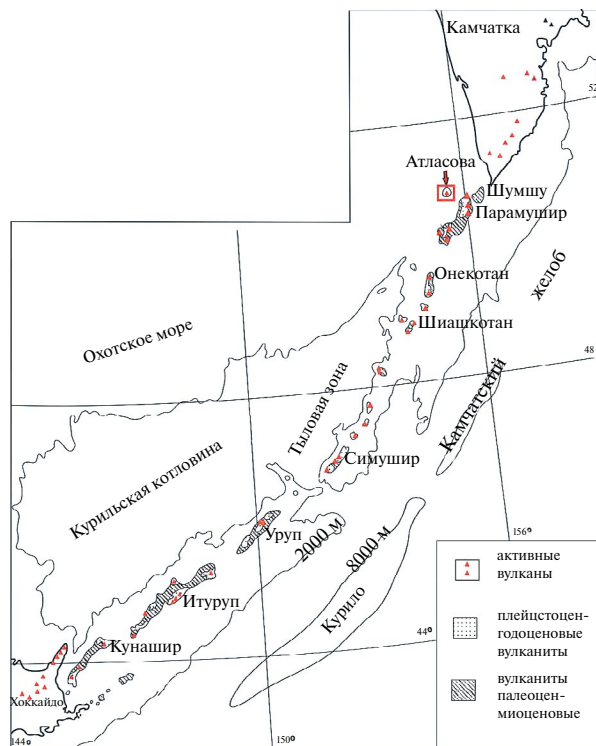


Рис. 1. Схематическая карта Курильских островов, по (Мартынов и др., 2010) с небольшими изменениями.

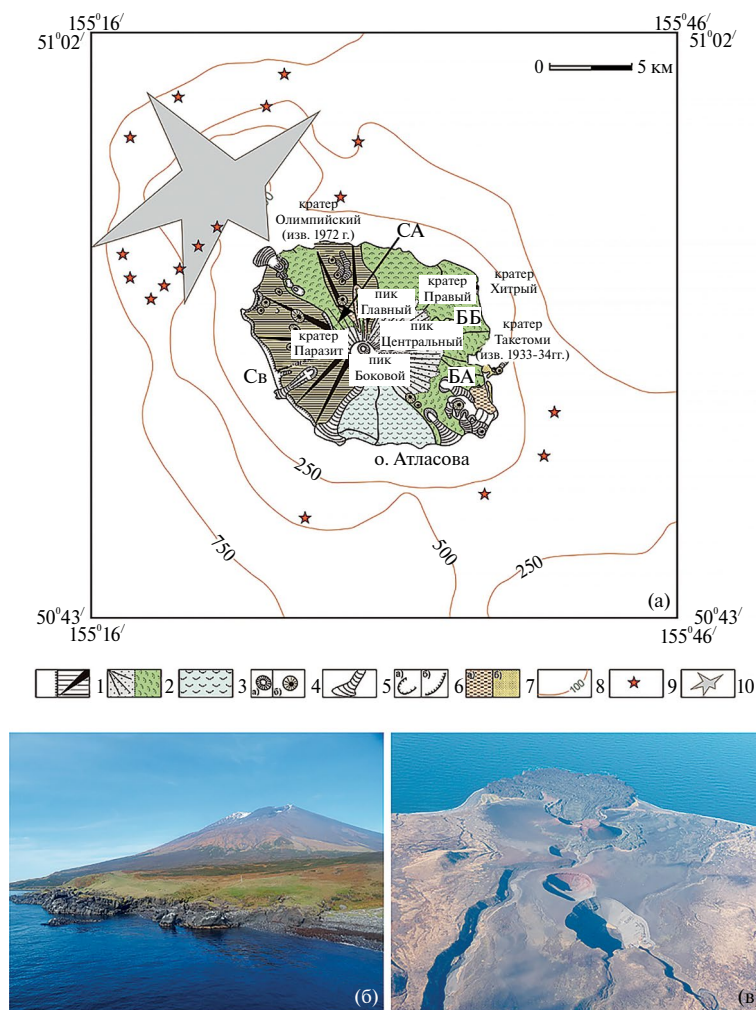


Рис. 2. Схема строения вулканического массива Алаид (а), по (Абдурахманов и др., 1978; Блох и др., 2006а, 2006б) с изменениями. 1 — древний конус вулкана Алаид; 2 — молодой конус вулкана Алаид и его лавовые потоки; 3 — лавовые потоки центрального конуса вулкана Алаид; 4 — терминальный (а) и побочные латеральные шлаковые конусы (б) вулкана Алаид; 5 — лавовые потоки внутреннего и побочных шлаковых конусов вулкана Алаид; 6 — кратеры (а) и эрозионные уступы (б) вулкана Алаид; 7 — морская терраса (а) и пирокластические образования кратера Такетоми (б); 8 — изобаты (м); 9 — подводные лавовые конусы; 10 — подводный вулкан Григорьева.

Вулкан Алаид 02.10.2020 г., вид с юго-востока (б). Прорыв Олимпийский (в). Фото В.А. Рашидова. СА — сейсмо-станция Алаид, Св — скала Свечка, БА — бухта Алаидская, ББ — бухта Баклан.

вулкана Григорьева (Блох и др., 2006а, 2006б, 2023), следует, по нашему мнению, отнести его природность к зоне сочленения Курильского и Камчатского сегмента Курило-Камчатской дуги. Эта зона характеризуется пересечением линейных зон повышенной проницаемости северо-западной и северо-северо-восточной ориентировки (Абдурахманов и др., 1978; Геолого-геофизический ..., 1987; Федорченко и др., 1989; Подводный ..., 1992; Диденко и др., 2021). Е.К. Мархинин (1967) предполагал существование питающего разлома северо-северо-восточного простирания, протягивающегося через вулканы хребта Карпинского, о. Парамушир. По данным (Сергеев, 1966), вулкан Алаид локализован в пределах четвертичной

вулcano-тектонической зоны, кулисообразно проходящей через активные камчатские вулканы Ксудач, Желтовский, Ильинский и Дикий Гребень. Под вулканом Алаид диагностируется область аномально низкого гравитационного поля (Бобошина и др., 1985) со значениями теплового потока, варьирующими в диапазоне 78–81 мВт/м² (Геолого-геофизический ..., 1987).

Глубина до сейсмофокальной зоны под вулканом Алаид составляет 220–230 км и является максимальной для Курильской островной дуги (Пискунов и др., 1979; Абдурахманов и др., 1981).

Для вулкана Алаид характерны этно-стромболианский, вулканский, вулканско-стромболианский и субплинианский типы извержений

(Абдурахманов и др., 1978; Федотов и др., 1982; Блох и др., 2006а, 2006б). Возраст современной вулканической постройки, не подтвержденный инструментальными методами, считается близким к 60 тыс. лет (Мелекесцев, 1980). В работе (Абдурахманов и др., 1978) предполагается, что древняя постройка вулкана имеет среднеплейстоценовый возраст, а молодая — верхнеплейстоценовый, причем распространение ранних вулкаников ограничено прибрежной полосой западного склона острова.

Современную постройку вулкана Алаид (рис. 2) от других наземных вулканов Курильской островной дуги отличает большое число наземных (не менее 36; Блох и др., 2023) и подводных паразитических кратеров со шлаковыми конусами, сконцентрированными как у его основания, так и на склонах. Подавляющее большинство побочных конусов приурочено к линии разлома северо-западного простираения (Горшков, 1967; Абдурахманов и др., 1978; Геолого-геофизический ..., 1987; Подводный ..., 1992; Varanov et al., 2002), однако можно выделить и непротяженные цепочки северо-северо-восточного простираения, соосные простираению Большой Курильской гряды. На одной из них располагается конус Такетоми, который начал извергаться в 1933 г. как подводный вулкан, присоединившись позднее к о-ву Атласова (Tanakadate, 1942; Рашидов, 2023). Кроме того, на подводных склонах острова-вулкана Алаид и на подводном вулкане Григорьева находится множество подводных конусов (рис. 2).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу настоящего исследования положена оригинальная коллекция из 58 геологических проб (см. Supplementary² 1, ESM_1) современной постройки вулкана Алаид, отобранных в ходе наземных и морских экспедиционных работ Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН на семи разновысотных участках в период 1972–2013 гг. (http://www.kscnet.ru/ivs/grant/grant_05/kurily/grigorjev.php; http://www.kscnet.ru/ivs/grant/grant_06/06-3-A-08-326/index.html).

Макро- и микроэлементный состав пород (см. Supplementary 2, ESM_2) определялся в аналитическом центре Дальневосточного геологического

института (ДВГИ) ДВО РАН. Концентрации петрогенных компонентов определялись методами гравиметрии (SiO_2) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3^* , CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O , P_2O_5) с использованием спектрометра ICAP 6500 Duo (Thermo Electron Corporation, США). Определение концентраций микроэлементов выполнялось на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Agilent Technologies, США). Для расчета концентраций использовали градуировку по сертифицированным растворам CLMS-1-4 фирмы SPEX (США) с концентрациями элементов 0.1; 1.0; 5.0 нг/мл и с контролем дрейфа сигнала по внутреннему стандарту. Нивелирование матричного эффекта достигалось путем разбавления готовых растворов проб для анализа в 10 000 раз, соответственно. Пределы обнаружения (ПО) оценивались по 3σ критерию: $\text{ПО} = C_{\text{контр}} + 3\sigma$, где $C_{\text{контр}}$ — величина среднего значения контрольного опыта, σ — среднеквадратичное отклонение его измерения по данным, полученным для контрольных проб. Для решения задачи обеспечения правильности полученных результатов применялись стандартные образцы базальтов JB-2, JB-3 и андезита JA-2 (Япония) (Imai et al., 1995). Для каждого стандартного образца при соответствующих условиях анализа находили соотношение $C_{\text{ср}}/C_{\text{Атт}}$, где $C_{\text{ср}}$ — полученное среднее содержание, $C_{\text{Атт}}$ — аттестованные значения. Относительное стандартное отклонение составило в среднем 5–10% для всех стандартных образцов.

Изотопные Sr-Nd-Pb характеристики базальтов (Supplementary 3, ESM_3) были получены в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии (ИГХ) СО РАН им. А.П. Виноградова (г. Иркутск) и в Институте геологии и геохронологии докембрия (ИГГД) РАН (г. Санкт-Петербург). В ИГХ СО РАН анализы изотопного состава Sr, Nd, Pb проводились на многоколлекторном масс-спектрометре MC-ICP-MS «Neptune Plus» в статическом режиме.

Выделение чистых фракций стронция из геологических проб осуществлялось по двухстадийной схеме (Birck, 1986). Измеренные отношения нормированы по $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$. Правильность результатов определения изотопного состава $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ оценивалась по результатам измерения стандартных образцов, которые в процессе проведения аналитических работ составили: SRM-987 (2SD, $n = 35$) — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71026 \pm 3$; BCR-2 (2SD, $n = 15$) — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70501 \pm 1$ и AGV-2 (2SD, $n = 19$) — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70396 \pm 3$.

Выделение чистых фракций неодима проводилось по принятым методикам (Yang et al., 2011). Нормализация изотопного состава $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ проводилась по $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. Измерения изотопного состава и концентраций в стандартных

²В дополнительных материалах к русской онлайн-версии статьи на сайте <https://elibrary.ru/> и <https://link.springer.com> приведены:

Supplementary 1, ESM_1.pdf — Описание и координаты образцов вулкана Алаид, о. Атласово, Курильские острова; Supplementary 2, ESM_2.pdf — Содержание петрогенных оксидов и микроэлементов в представительных образцах вулкана Алаид; Supplementary 3, ESM_3.pdf — Изотопный состав Sr, Nd и Pb в базальтах вулкана Алаид.

образцах дали следующие результаты: JNd1 (2SD, $n = 40$) — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512107 \pm 4$ (рекомендованное значение — 0.512115 ± 7 (Tanaka et al., 2000)); BCR-2 (2SD, $n = 48$) — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512631 \pm 4$; AGV-2 (2SD, $n = 22$) — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512780 \pm 8$.

Измерение изотопного состава свинца проводилось с использованием метода двойного изотопного разбавления. Применялся смешанный трассер $^{207}\text{Pb} + ^{204}\text{Pb}$ со значениями $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в трассере в соответствии с рекомендациями (Rudge et al., 2009). Правильность результатов определения изотопного состава свинца оценивалась по результатам измерения стандартного образца NBS-981, нормированные изотопные отношения в котором равны: $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.7029 \pm 35$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.4911 \pm 16$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.9372 \pm 6$ (2SD, $n = 22$).

В ИГГД РАН анализы изотопного состава Sr и Nd проводились на многоколлекторном масс-спектрометре TIMS Triton, а изотопного состава Pb — на многоколлекторном TIMS Finnigan-261 в статическом режиме. Подготовка проб для изотопных анализов Nd и Sr, включая химическое разложение и последующее выделение элементов методом ионообменной хроматографии, подробно описана в работе (Саватенков и др., 2004). Воспроизводимость результатов контролировалась определением состава стандартов La Jolla и SRM-987. За период измерений Sr полученное значение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в стандарте SRM-987 соответствовало 0.710241 ± 15 (2σ , $n = 10$), а величина $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте La Jolla

составила 0.511847 ± 8 (2σ , $n = 12$). Изотопный состав Sr нормализован по $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$, а состав Nd — по $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. Изотопный состав Nd приведен к табличному значению стандарта La Jolla $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511860$.

Химическое выделение Pb из пород проводилось по стандартной методике (Manhes et al., 1984). Поправку изотопных отношений Pb на фракционирование проводили по методике двойного изотопного разбавления с использованием трассера $^{204}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$. Ошибки измерения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, определенные по серии параллельных анализов стандарта породы BCR-1, не превышали 0.03%, 0.03% и 0.05% соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петрография вулканитов

Первые сведения о минеральном составе пород, слагающих постройку острова-вулкана Алайд, были получены японскими исследователями (Kuno, 1935; Tanakadate, 1935a, 1935b; Tanakadate, Kuno, 1935), которые установили, что породы, слагающие побочный вулкан Такетоми (рис. 2), сложены авгитосодержащими оливин-плагиоклазовыми порфировыми базальтами. Базальты извержений вулкана Алайд, включая современные и относительно древние побочные конусы,

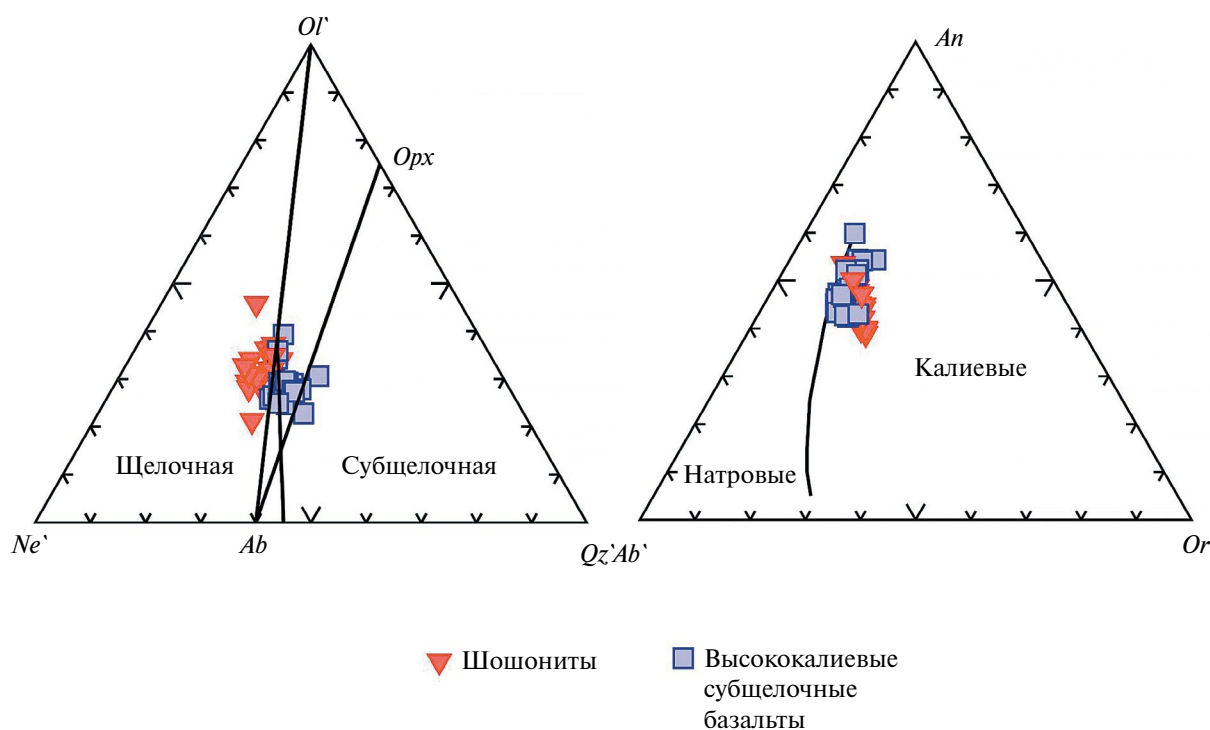


Рис. 3. Классификационные диаграммы (Irvine, Baragar, 1971).

считались однотипными по составу минералов вкрапленников, среди которых резко преобладали пироксен-плагиоклазовые и плагиоклазовые парагенезисы при подчиненном развитии оливинсодержащих ассоциаций (Абдурахманов и др., 1978; Флеров и др., 1982; Хренов, 1982; Происхождение ..., 1985; Федорченко и др., 1989; Диденко и др., 2021).

Настоящие исследования показали, что это в большей мере справедливо для пород молодого конуса вулкана, лавовых потоков его центрального конуса и побочных латеральных шлаковых конусов. Базальты древнего конуса вулкана, развитые в западной части острова в районе скалы Свечка (рис. 2; Supplementary 1, ESM_1), характеризуются широким развитием оливинсодержащих парагенезисов. Часто отмечаются крупнопорфировые оливин-клинопироксен-плагиоклазовые разности пород, в которых вкрапленники оливина и клинопироксена достигают размера 0.5–1 см, часто образуя гломеропорфировые сростания. В базальтах древнего конуса спорадически отмечаются мегакристы амфибола, достигающие 1–1.5 см по удлинению.

Базальты как молодого конуса вулкана и молодых шлаковых конусов, так и лавы древнего конуса вулкана содержат гомеогенные включения микрогаббро плагиоклаз-клинопироксенового состава. Кроме того, отмечены ксенолиты, представленные измененными породами прикратерной зоны (Авдейко и др., 1974, 1977; Абдурахманов и др., 1978; Богатиков, Цветков, 1988; Федорченко и др., 1989; Подводный ..., 1992 и др.), и пемзами, опробованными в районе извержения прорыва Олимпийский в 1972 г. (Флеров и др., 1978).

Макро- и микроэлементный состав вулканитов

Многочисленные отечественные исследователи в разные годы приводили фрагментарные сведения о составе горных пород, слагающих различные участки острова (Авдейко и др., 1974, 1977; Абдурахманов и др., 1978; Горшков, 1967; Горшков, Богоявленская, 1962; Мархинин, 1967; Подводный ..., 1982; Хренов, 1982; Флеров и др., 1982; Происхождение ..., 1985; Федорченко и др., 1989; Bergal-Kuvikas, 2015; Диденко и др., 2021). Обобщая цитируемые публикации, можно сделать вывод о том, что в продуктах извержений вулкана Алайд, включая современные и относительно древние побочные конусы, преобладают лейкократовые базальты, тогда как меланократовые базальты находятся в подчиненном количестве. Незначительное распространение имеют авгит-оливиновые и пироксен-оливиновые андезибазальты. Сопоставление составов базальтов извержений вулкана Алайд в 1981 г. (см. Supplementary 2, ESM_2; Происхождение ..., 1985; Флеров и др., 1982) и 2015–2016 гг. (Диденко и др., 2021) позволяет сделать предположение о том, что в настоящее время наблюдается тенденция

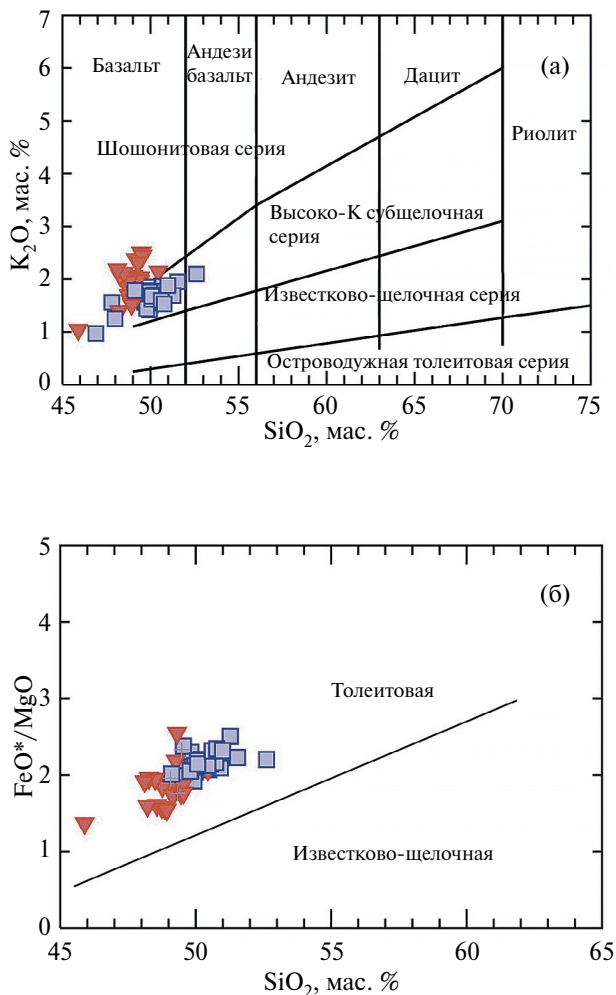


Рис. 4. Классификационные диаграммы (а) K₂O–SiO₂ (Le Maitre et al., 1989, 2002; Peccerilo, Taylor, 1976) и (б) FeO*/MgO–SiO₂ (Miyashiro, 1974). Условные обозначения см. рис. 3.

к повышению основности извергаемых лав. Является ли эта тенденция устойчивой, можно будет установить после изучения образцов извержения 2022 г., отобранных летом 2023 г. (Большаков и др., 2023).

Авторами изучена наиболее представительная в настоящее время коллекция базальтов вулкана Алайд (см. Supplementary 1, ESM_1–Supplementary 3, ESM_3; рис. 2). Это позволило выделить два петрохимических типа — высококальциевые субщелочные базальты и Ne-нормативные шошониты (рис. 3), хотя на геохимических диаграммах между ними отсутствуют четкие границы (рис. 4а, 4б).

По содержанию SiO₂ 56 из 58 проанализированных нами образцов (Supplementary 2, ESM_2) соответствуют базальтам (SiO₂ < 52 мас. %). В координатах K₂O–SiO₂ (рис. 4а) субщелочные лавы классифицируются как высококальциевые базальты

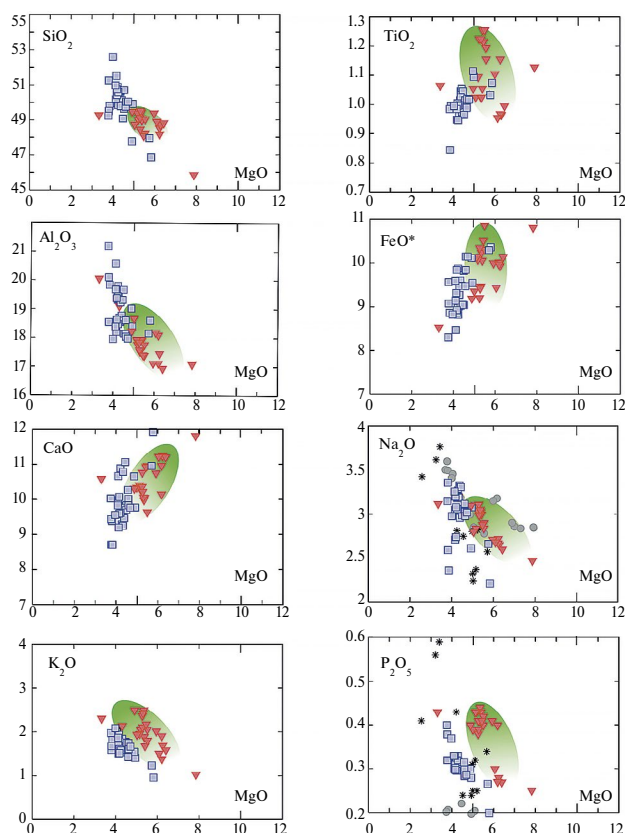


Рис. 5. Вариации содержаний петрогенных оксидов в лавах вулкана Алайд в зависимости от концентрации MgO.

Оксиды в мас. %. Залитое поле — щелочные лавы. Условные обозначения см. рис. 3.

известково-щелочной серии, а щелочные — как шошониты. На диаграмме FeO^*/MgO — SiO_2 (рис. 4б) оба типа лав попадают в поле толеитов. Вариации петрогенных компонентов относительно содержания MgO (мас. %) в базальтах, как индикатора фракционированности последних, представлены на рис. 5. Эти вариационные диаграммы показывают существование обособленных трендов по накоплению K_2O и P_2O_5 в обоих типах базальтов. Уменьшение магнезиальности пород обоих типов сопровождается ростом содержаний SiO_2 , Al_2O_3 и уменьшением CaO и FeO^* . Для TiO_2 и Na_2O четко проявленные сериальные тренды отсутствуют.

Вариации некоторых микроэлементов — Rb, Ba, Sr, Pb, Ni, Cr, Zr, Hf, Nb относительно содержания MgO (мас. %) в базальтах представлены на рис. 6. Для всех этих элементов в зависимости от магнезиальности составы обоих типов базальтов образуют дискретные тренды или поля.

Конфигурация спектров распределения некогерентных элементов, нормализованных к N-MORB (рис. 7а) и хондриту (рис. 7б), в обоих типах пород

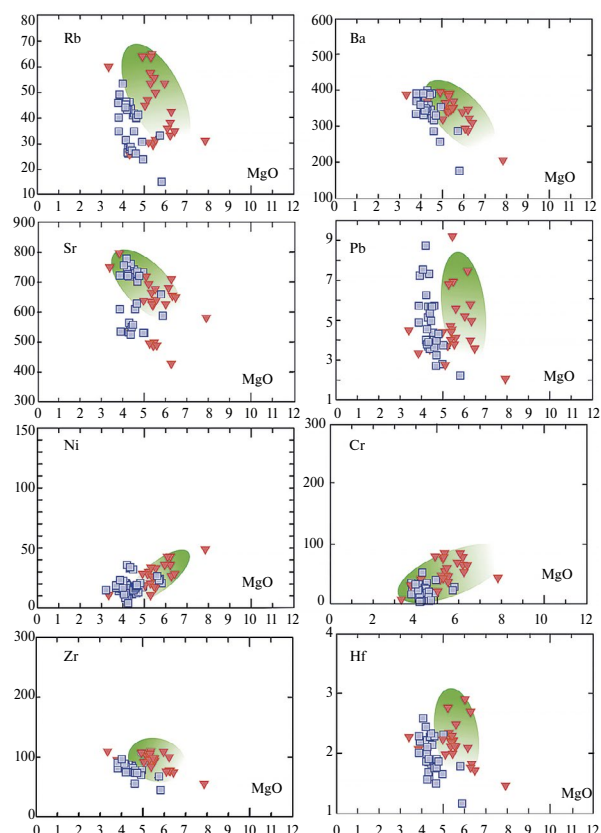


Рис. 6. Вариации содержаний микроэлементов в лавах вулкана Алайд в зависимости от концентрации MgO.

Оксиды в мас. %, микроэлементы в г/т. Залитое поле — щелочные лавы. Условные обозначения см. рис. 3.

очень сходная. Аномалии Eu и Ce отсутствуют во всех проанализированных образцах.

Относительно высокие концентрации редкоземельных элементов (REE), по сравнению с фоновыми значениями, обогащенность легкими (LREE) и тяжелыми (HREE), а также крупноионными литофилами (LILE) при низких содержаниях элементов высокочargedной группы (HFSE) свидетельствуют об интенсивной переработке мантийного вещества высокотемпературными субдукционными компонентами — расплавом и/или надкритическим флюидом (рис. 8). Составы как высококальциевых субщелочных базальтов, так и Ne-нормативных шошонитов образуют субгоризонтальные тренды, свидетельствуя об определяющей роли субдукционных расплавов как метасоматизирующего фактора.

Высокие значения $\text{K}_2\text{O}/\text{Rb}$ и Rb/Sr указывают на присутствие биотита и амфибола в источнике, а низкие величины Sr/Y и плоские спектры распределения средних и тяжелых лантаноидов — на отсутствие граната в реститовой ассоциации (рис. 9).

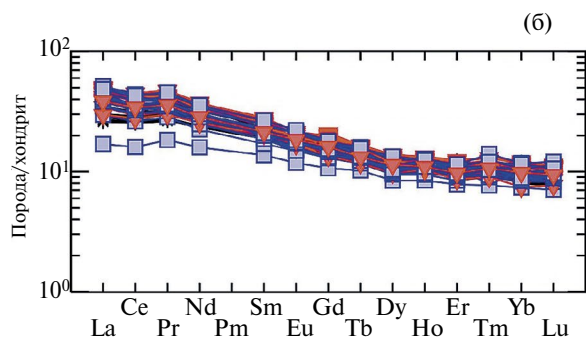
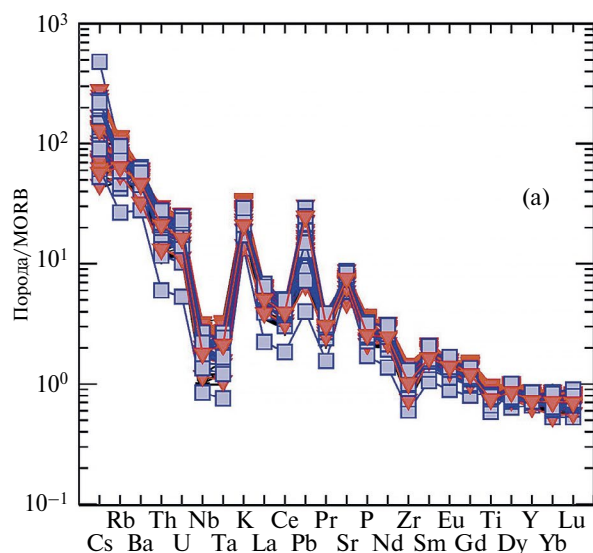


Рис. 7. Спектры распределения микроэлементов в лавах вулкана Алаид, нормализованные к N-MORB (а) и хондриту (б) (Sun, McDonough, 1989). Условные обозначения см. рис. 3.

Общей особенностью проанализированных образцов являются и существенные вариации содержаний макро- и микрокомпонентов при близкой концентрации MgO (рис. 5, 6). Наряду с общими геохимическими признаками, существует и ряд важных отличий. Для Ne-нормативных лав характерны более высокие содержания MgO (5–7 мас. %), TiO_2 (0.9–1.2 мас. %), Rb, Ni, Cr, Zr, Nb, отчасти Hf при пониженных концентрациях SiO_2 (48–49 мас. %), Al_2O_3 (17–19 мас. %), Na_2O (< 3 мас. %) и Sr (рис. 5, 6, 10).

Sr-Nd-Pb изотопная систематика вулканитов

Ne-нормативные шошониты и высококальциевые субщелочные базальты вулкана Алаид показывают небольшие вариации значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

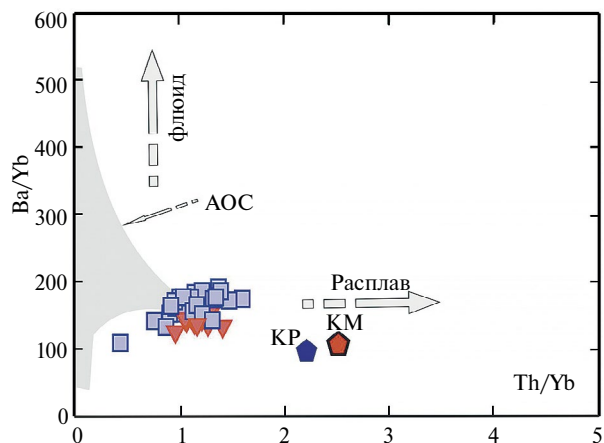


Рис. 8. Диаграмма Th/Yb–Ba/Yb.

Условные обозначения см. рис. 3. Валовый состав океанических осадков во фронтальной зоне Курил (KP) и Камчатки (KM) (Plank, Langmuir, 1998). AOC – измененная океаническая кора.

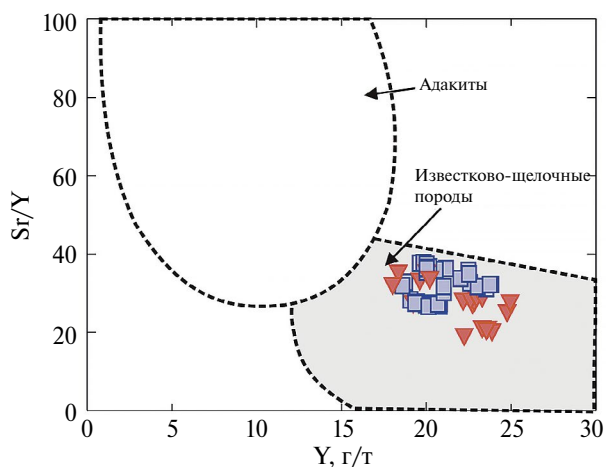
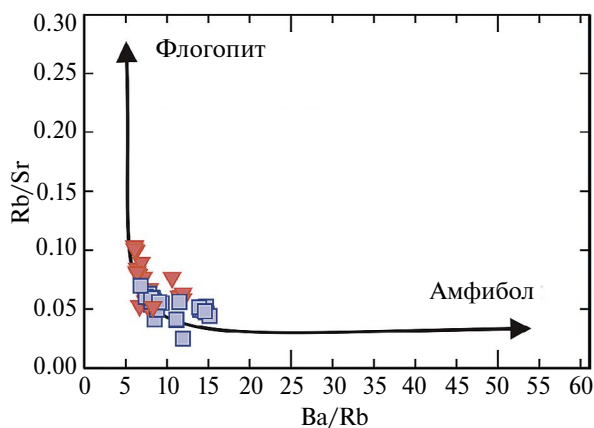


Рис. 9. Индикаторные геохимические признаки амфибола, флогопита и реститового граната, по (Defant, Drummond, 1990) с изменениями. Условные обозначения см. рис. 3.

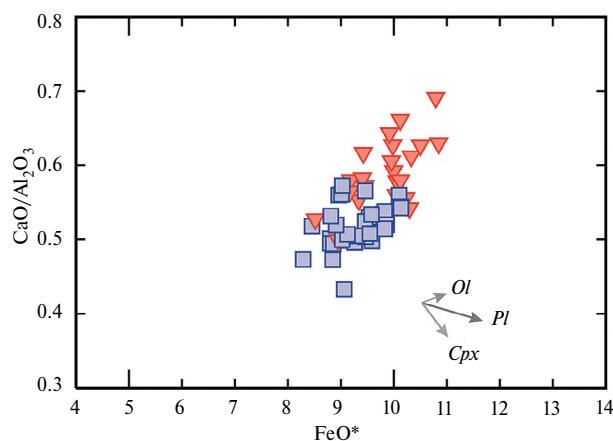


Рис. 10. Диаграмма $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ – FeO^* для Ne-нормативных шононитов и высококальциевых субщелочных лав вулкана Алаид. Условные обозначения см. рис. 3.

(0.70322–0.70302) и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.51303–0.51301), формируя субвертикальный тренд в верхней правой части поля MORB Индийского океана (рис. 11а). От базальтов фронтальной зоны (о. Парамушир) они отличаются более низкими содержаниями радиогенного стронция. Ранее подобная закономерность отмечалась для Южных Курил (Мартынов и др., 2009а, 2009б, 2010).

При решении вопросов магмогенезиса и геодинамики Северо-Западной Пацифики информативными являются изотопы свинца (Мартынов и др., 2012). На классификационных диаграммах составы исследованных образцов располагаются в узкой области поля MORB Индийского океана ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.30$ – 18.53 , $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.31$ – 15.51 , $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.17$ – 37.93), смещенной, по сравнению с фронтальными лавами Курил, к полю MORB Тихого океана (рис. 11б). Близкий к линейному характер тренда указывает на участие в магмогенезисе двух изотопных резервуаров — индийского и тихоокеанского MORB-типа (Klein et al., 1988; Rehkamper, Hofmann, 1997; Pearce et al., 1999; Nebel et al., 2007). Учитывая конфигурацию этих резервуаров в Северо-Западной Пацифике (Мартынов и др., 2012), можно предположить участие в магматическом процессе как надсубдукционной мантии, так и океанической литосферы и/или астеносферы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Роль пироксенитовой мантии в магмогенезисе

Бедные SiO_2 калиевые щелочные магмы в небольших объемах (<1%) встречаются в различных геодинамических обстановках, в том числе субдукционных. Их происхождение часто

рассматривается как многостадийный процесс плавления надсубдукционных ультрабазитов, которые обогащены амфиболом и/или флогопитом в результате фильтрации флюида и/или расплава из подстилающей океанической плиты (Sorbadere et al., 2013; Straub et al., 2013). Участие наряду с ультрабазитовым минеральным парагенезисом пироксенитовой ассоциации минералов в генерации основных расплавов для OIB предполагалось, например, в работах (Morgan, 2001; Sobolev et al., 2007; Herzberg, 2011), для MORB — в (Allègre, Turcotte, 1986; Ingle et al., 2010), для надсубдукционных лав — в (Straub et al., 2013). Пироксенитовый компонент был реконструирован на основании изотопно-геохимических исследований валового состава пород (Nikulin et al., 2012; Давыдова и др., 2019) и расплавных включений в оливинах из вулкаников (Некрылов и др., 2018) Центрально-Камчаткой депрессии и Срединного хребта.

Установить роль амфибол-пироксенитовой ассоциации в происхождении высококальциевых магм вулкана Алаид позволяет изучение однообразных Ne-нормативных и субщелочных базальтов. Щелочные вулканики обогащены не только некогерентными элементами, но и MgO , Ni и Cr (рис. 5, 6).

Происхождение бедных SiO_2 щелочных расплавов в результате плавления ультрабазитов возможно при 5–1.8 ГПа (Kushiro, 1996; Falloon et al., 2001; Till et al., 2012), но подобному механизму противоречит отсутствие признаков реститового граната (рис. 7, 9).

Кроме того, плавление перидотита при высоком давлении должно приводить к появлению магматической жидкости с низкими значениями $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, тогда как в Ne-нормативных лавах оно достигает 0.7, превышая таковое в субщелочных базальтах.

Происхождение Ne-нормативных расплавных включений в форстеритах примитивных островодужных магм рассматривается как результат плавления гетерогенной перидотитовой-амфибол-клинопироксенитовой мантии (например, Sorbadere et al., 2013). Присутствие амфибола и флогопита в магматическом источнике вулкана Алаид подтверждается геохимическими методами (рис. 9), а процессы смешения линейными трендами на изотопных диаграммах (рис. 11–13). На дискриминационной диаграмме составы исследованных базальтов компактно проецируются в область смешения перидотитового и пироксенитового компонентов (рис. 14). Влияние перидотитовой мантии на состав Ne-нормативных пород прослеживается в высоких концентрациях MgO , TiO_2 , Ni и Cr , а роль пироксенитовой — в повышенных концентрациях SiO_2 (>50 мас. %), Na , P и Al в субщелочных вулканиках (Straub et al., 2013). Благоприятным

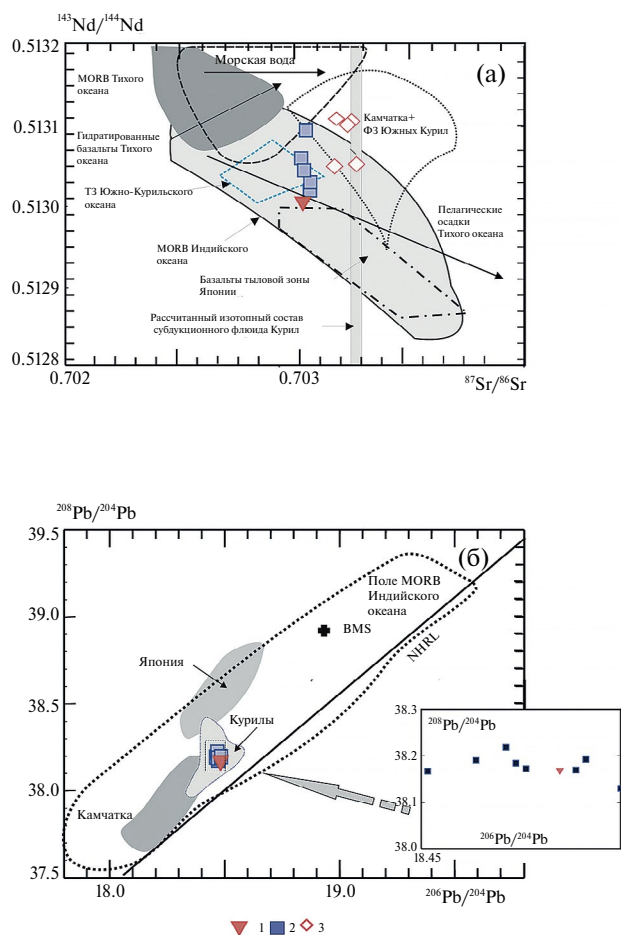


Рис. 11. Изотопные отношения Sr–Nd (а) и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (б) в лавах вулкана Алаид, по (Мартынов, 2010; Мартынов и др., 2007, 2009а, 2009б, 2010) с дополнениями.

1, 2 – см. рис. 3; 3 – базальты фронтальной зоны (о. Парамушир). Рассчитанный изотопный состав субдукционного флюида (Ishikawa, Tera, 1997). Полями околнурены составы базальтов: Тихого (залитое темно-серым) и Индийского (контур – сплошная линия) океанов, гидратированных океанических лав (контур – штриховая линия), четвертичных вулканов Камчатки и ФЗ (фронтальная зона) Южных Курил (пунктирная линия), тыловой зоны Японской островной дуги (контур – штрих-пунктирная линия). Штриховой линией голубого цвета околнурено поле четвертичных вулканов ТЗ (тыловая зона) Южно-Курильской котловины. Поле лав вулканов Курильской островной дуги по (Диденко и др., 2021; Мартынов и др., 2009а, 2009б; http://www.kscnet.ru/ivs/grant/grant_06/06-3-A-08-326/index.html).

На врезке – более крупный масштаб на рис. (б). BMS (Bulk Marine Sediment) – валовой состав океанического осадка (Plank, Langmuir, 1998). NHRL (North Hemisphere Reference Line) – линия средних составов базальтов северного полушария.

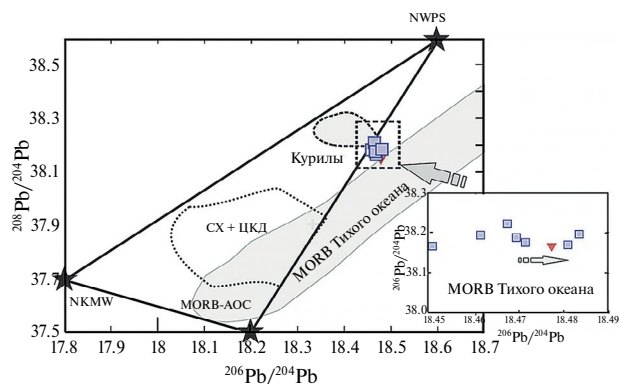


Рис. 12. Составы лав вулкана Алаид в координатах конечных изотопных членов субдукционной системы северной части Камчатского полуострова, по (Давыдова и др., 2019) с дополнениями.

NWPS – осадки Северо-Западной Пацифики, MORB-AOC – средний состав MORB из офиолитов Камчатки, NKMW – состав мантийного клина Северной Камчатки по (Portnyagin et al., 2015); CX+ЦКД – плиоценовые породы Срединного хребта (Volynets et al., 2010) и Центрально-Камчатской депрессии по (Kayazar et al., 2014; Portnyagin et al., 2015). Поле MORB Тихого океана по (Перепелов, 2014; Tollstrup et al., 2010).

На врезке – увеличенный масштаб. Условные обозначения см. рис. 3.

для смешения можно считать реконструированное высокое содержание воды и низкое общее давление, сближающее температуры солидуса перидотитов и пироксенитов (Sorbader et al., 2013).

Вопросы геодинамики

Вулкан Алаид отличается от других вулканических центров Курильской островной дуги не только составом продуктов извержения, но и уникальной геодинамической позицией в тыловой зоне островной дуги на границе Курильского и Камчатского сегментов (Мартынов и др., 2010), в узле пересечения линейных зон повышенной проницаемости (Абдурахманов и др., 1978; Федорченко и др., 1989). Аномальный тектонический режим проявлений щелочного вулканизма отмечается во многих, если не во всех островодужных системах Тихоокеанского региона.

Калиевые щелочные магмы проявлены в областях горячей субдукции молодых океанических плит. В Каскадных горах Северной Америки и в Юго-Западной Японии при температуре, превышающей 800°C (936°C на севере Каскадных гор (Sygacuse et al., 2010)) на поверхности океанической плиты под вулканическим фронтом, в плавление вовлекаются не только терригенные осадки, но и гидратированные океанические базальты (Ryan, Chauvel, 2014), что приводит к формированию

сложной магматической ассоциации шошонитов и щелочных эффузивов с высокомагнезиальными андезитами и адакитами (Kimura et al., 2014).

В холодных субдукционных системах, например Курильской, где температура на поверхности плиты не превышает 700°C (713°C для Северных Курил (Syracuse et al., 2010)), калиевые щелочные вулканы проявлены в зонах локального растяжения.

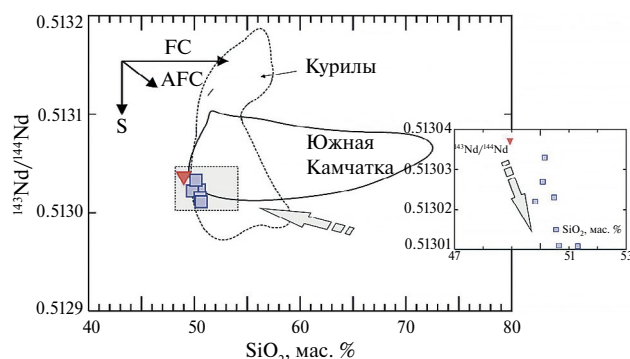


Рис. 13. Отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ – SiO_2 в лавах вулкана Алаид, по (Мартынов и др., 2010; Martynov et al., 2010) с дополнениями.

FC – фракционная кристаллизация, AFC – фракционная кристаллизация + коровая контаминация, S – вариации составов источника.

На врезке – более крупный масштаб. Условные обозначения см. рис. 3.

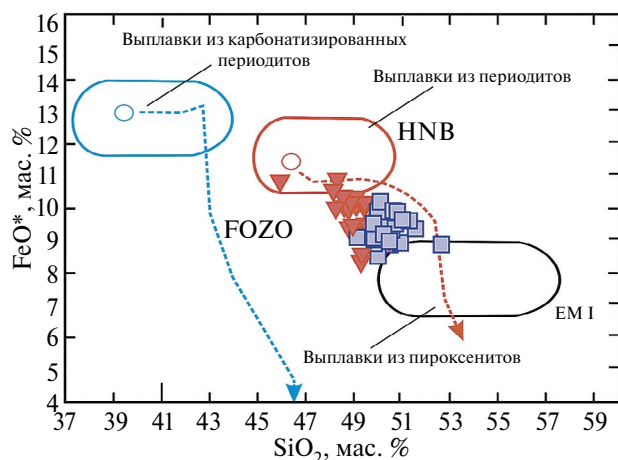


Рис. 14. Геохимические признаки перидотитового и пироксенитового источников, по (Kimura et al., 2018) с упрощениями и дополнениями.

Мантийные компоненты: FOZO – мантия фокусной зоны; DMM – деплетированный мантийный источник MORB; HNB – высоко-Nb базальты; EM I – обогащенная мантия I-типа. Штриховыми линиями показаны пути фракционной кристаллизации. Поля выплавки: из карбонатизированных перидотитов по (Sakuyama et al., 2013), из перидотитов по (Kogiso et al., 1998), из пироксенитов по (Pertermann, Hirschmann, 2003). Условные обозначения см. рис. 3.

Подобное наблюдается в Южных Андах (Gutiérrez et al., 2005; Espinoza et al., 2008; Varekamp et al., 2010), в Транс-Мексиканском вулканическом поясе (Mori et al., 2009; Verma, 2009), в Индонезии (Edwards et al., 1994) и на Камчатке (Давыдова и др., 2019). Аналогичная закономерность проявлена и в молодых коллизионных зонах, например в Тибете (Wang et al., 2008; Guo et al., 2014; Yücel et al., 2017; Moghadam et al., 2018).

Роль субдукционного меланжа в происхождении щелочных высококалийных магм

Для высококалийных лав вулкана Алаид реконструируются геохимические признаки участия в магмогенезе субдукционного меланжа – гетерогенный макро- и микроэлементный состав, близкие изотопные характеристики, присутствие водных минералов и низкобарические условия плавления. Важная роль этого источника в происхождении островодужных магм предполагалась в работе (Marschall, Schumacher, 2012), а для щелочных расплавов была экспериментально подтверждена в работе (Cruz-Urbe et al., 2018). Механизм этого процесса остается дискуссионным. В оригинальных работах (Marschall, Schumacher, 2012; Guo et al., 2014; Cruz-Urbe et al., 2018) предполагался холодный диапиризм обводненного вещества от границы субдуцирующей плиты и надсубдукционной мантии и последующее его плавление на ее более «горячих» участках. Однако субдукционный меланж, скорее всего, представляет собой уникальный магматический источник, ответственный за происхождение аномальных для островных дуг щелочных пород в аномальных динамических условиях. Растяжение литосферы и адиабатический подъем горячего астеносферного материала меняют температурный профиль надсубдукционной мантии, вовлекает в процесс плавления субдукционный меланж и приводит к образованию нетипичных для островных дуг щелочных лав.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования внесли существенный вклад в изучение островодужного вулканизма Тихого океана и в очередной раз показали уникальность вулкана Алаид для изучения различных вулканических процессов.

Впервые в отечественной практике исследована такая представительная коллекция горных пород, слагающих семь разновысотных участков острова-вулкана Алаид, а анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что аномальный для Курильской островной дуги высококалийный щелочной и субщелочной вулканизм является следствием локальных тектонических процессов на ее

северном участке, в результате которых в магматический процесс были вовлечены образования субдукционного меланжа. В настоящее время наблюдается тенденция к повышению основности извергаемых лав.

Благодарности. Статья посвящается памяти исследователя вулканов Курильской островной дуги А.И. Абдурахманова (<http://www.kscnet.ru/ivs/memory/Arslan/>).

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам ИВиС ДВО РАН Л.П. Аникину за помощь при проведении наземных экспедиционных работ и В.В. Ананьеву за помощь в оформлении графических материалов, а также сотрудникам ДВГИ ДВО РАН А.И. Малиновскому и А.А. Чацину за ценные советы и консультации, также благодарят анонимных рецензентов за конструктивные замечания, позволившие улучшить работу.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственных заданий ДВГИ ДВО РАН по теме «Эндогенные процессы формирования континентальной литосферы восточной окраины Азии», регистрационный номер 122040800196-7; ИВиС ДВО РАН по теме НИР FWME-2024-0012 «Закономерности строения и эволюции Курило-Камчатской островодужной системы и прикамчатской акватории Тихого океана: геохимические и минералогические особенности пород, источники вещества, порообразующие процессы, полезные ископаемые, регистрационный номер 124031400017-5»; ИГХ СО РАН по теме: «Роль магматических, метаморфических и геодинамических процессов в рециклинге вещества и формировании изотопно-геохимически неоднородной континентальной литосферы в складчатом обрамлении Сибирского кратона», регистрационный номер 121102500039-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдурахманов А.И., Пискунов Б.Н., Смирнов И.Г., Федорченко В.И. Вулкан Алаид (Курильские острова) // Восточно-Азиатские островные системы (тектоника и вулканизм). Южно-Сахалинск, 1978. С. 85–107.
- Абдурахманов А.И., Ким Чун Ун, Пискунов Б.Н., Федорченко В.И. Соотношение содержания окиси калия и некоторых других литофильных элементов в лавах вулканов Курильских островов с глубиной до сейсмофокальной зоны // Древние сейсмофокальные зоны. Владивосток: Ин-т тектоники и геофизики ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 55–77.
- Авдейко Г.П., Хренов А.П., Флеров Г.Б. и др. Извержение вулкана Алаид в 1972 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1974. № 50. С. 64–80.
- Авдейко Г.П., Токарев П.И., Меняйлов И.А. и др. Извержение побочного прорыва Олимпийского на вулкане Алаид в 1972 г. // Вулканизм островных дуг. М.: Наука, 1977. С. 55–64.
- Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 362 с.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. Подводный вулкан Григорьева (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2006а. № 5. С. 17–26.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. Вулканический массив Алаид (Курильская островная дуга) // Материалы Международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма» к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный. Петропавловск-Камчатский, 25–30 марта 2006 г. / Отв. ред. Е.И. Горде-ев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006б. С. 135–143.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Наземно-подводные вулканические массивы Курильской островной дуги // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 13–17 ноября 2023 г. М.: ИО РАН, 2023. Т. III. С. 90–94.
- Бобошина В.А., Терещенков А.А., Харахинов В.В. Гравитационное поле Охотоморского региона и его интерпретация в комплексе с батиметрическими и сейсмическими данными // Тихоокеанская геология. 1985. № 5. С. 49–59.
- Богатиков О.А., Цветков А.А. Магматическая эволюция островных дуг. М.: Наука, 1988. 249 с.
- Большаков И.Е., Нуржаев А.А., Кузнецов Р.А. и др. Экспедиция на вулканы Алаид и Эбеко (Курильские острова) летом 2023 года // Вест. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 4. Вып. 60. С. 105–113. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-4-60-105-113>
- Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы // Под ред. К.С. Сергеева, М.Л. Красного. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 36 листов.
- Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. К петрографии современных вулканических пород Курильской островной дуги (Северные Курильские острова) // Общие вопросы вулканизма. Тр. лаборатории вулканологии. 1962. Вып. 21. С. 3–32.
- Давыдова М.Ю., Мартынов Ю.А., Перепелов А.Б. Эволюция изотопно-геохимического состава пород вулкана Уксичан (Срединный хребет, Камчатка) и ее связь с неогеновой тектонической перестройкой Камчатки // Петрология. 2019.

Т. 27. № 3. С. 283–308. <https://doi.org/10.31857/S0869-5903273282-307>

Диденко А.Н., Рашидов В.А., Марков Г.П. и др. Петромагнитная и геохимическая характеристика вулканитов извержения 2015–2016 гг. вулкана Алаид, Курильская островная дуга // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 3–21. <https://doi.org/10.31857/S0203030621010028>

Злобин Т.К., Пискунов В.Н., Фролова Т.И. Новые данные о структуре земной коры в центральной части Курильской островной дуги // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293. № 2. С. 185–187.

Мартынов Ю.А. Основы магматической геохимии. Владивосток: Дальнаука, 2010. 228 с.

Мартынов Ю.А., Рашидова В.А. Калиевый щелочной и субщелочной базальтовый вулканизм Курил – петрология, магмогенезис и геодинамика // Современные направления развития геохимии. Материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвященной 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона. Иркутск, 21–25 ноября 2022 г. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2022. Т. 2. С. 40–42.

Мартынов Ю.А., Дриль С.И., Чащин А.А. Геохимия базальтов островов Кунашир и Итуруп – роль несубдукционных факторов в магмогенезисе Курильской островной дуги // Геохимия. 2005. № 4. С. 369–383.

Мартынов Ю.А., Кимура Дж.И., Ханчук А.И. и др. Магматические источники четвертичных лав Курильской островной дуги: новые данные по изотопии стронция и неодима // Докл. АН. 2007. Т. 416. № 5. С. 670–675.

Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Дриль С.И., Мартынов А.Ю. Зоны аномального вулканизма Курильских островов, остров Парамушир // Вестник ДВО РАН. 2009а. № 4. С. 17–243.

Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Дриль С.И., Мартынов А.Ю. Продольная геохимическая зональность Курильских остров – роль субдукционных компонентов и мантийной гетерогенности в магмогенезисе // Вулканизм и геодинамика (материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009б. Т. 1. С. 425–428.

Мартынов Ю.А., Ханчук А.И., Кимура Дж.И. и др. Геохимия и петрогенезис четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Петрология. 2010. Т. 18. № 5. С. 512–535.

Мартынов Ю.А., Кимура Дж.И., Мартынов А.Ю. и др. Присутствие мантии индийского MORB-типа под Курильской островной дугой: результаты

изотопных исследований мафических лав о-ва Кунашир // Петрология. 2012. Т. 20. № 1. С. 102–110.

Мархинин Е.К. Роль вулканизма в формировании земной коры. М.: Наука, 1967. 355 с.

Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 211 с.

Некрылов Н.А., Попов Д.В., Плечов П.Ю. и др. Гранат-пироксенитовый источник расплавов на Камчатке: состав расплавных включений и оливина голоценовых пород Кекукнайского вулкана // Петрология. 2018. Т. 26. № 4. С. 335–357. <https://doi.org/10.1134/S0869590318040052>

Перепелов А.Б. Кайнозойский магматизм Камчатки на этапах смены геодинамических обстановок. Дисс. ... док. геол.-мин. наук. Иркутск: ИГХ СО РАН, 2014. 361 с.

Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Ю.М. Пущаровский. М.: Наука, 1992. 528 с.

Пискунов Б.Н., Абдурахманов А.И., Ким Ч.У. Соотношение состав–глубина для вулканов Курильской островной дуги и его петрологическое значение // Вулканология и сейсмология. 1979. № 4. С. 57–67.

Рашидов В.А. К 90-летию образования побочного вулкана Такетоми (остров Атласова, Курильская островная дуга) // Вест. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 3. Вып. № 60. С. 81–99. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-4-60-81-89>

Саватенков В.М., Морозова И.М., Левский Л.К. Поведение изотопных систем (Sm-Nd; Rb-Sr; K-Ar; U-Pb) при щелочном метасоматозе (фениты зоны экзоконтакта щелочно-ультраосновной интрузии) // Геохимия. 2004. № 10. С. 1027–1049.

Сергеев К.Ф. Геологическое строение и развитие района Северной группы Курильских островов. М.: Наука, 1966. 149 с.

Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 237 с.

Федотов С.А., Иванов Б.В., Флеров Г.Б. и др. Изучение извержения вулкана Алаид (Курильские острова) в 1981 г. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 9–28.

Флеров Г.Б., Хренов А.П., Петрова В.В. Пемзовые и пемзовидные включения в базальтах четвертичных вулканов Камчатки и Курил (первичная природа, состав и процессы пироматаморфизма) // Включения в вулканических породах Курило-Камчатской островной дуги / Отв. ред. Б.Г. Лутц, К.Н. Рудич, В.А. Ермаков. М.: Наука, 1978. С. 200–218.

Флеров Г.Б., Иванов Б.В., Андреев В.Н. и др. Вещественный состав пород продуктов извержения

вулкана Алайд в 1981 г. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 28–42.

Хренов А.П. Динамика извержений и процессы кристаллизации магм. М.: Наука, 1982. 129 с.

Allègre C.J., Turcotte D.L. Implications of a two-component marble-cake mantle // *Nature*. 1986. V. 323. P. 123–127.

Baranov B.V., Werner R., Hoernle K.A. et al. Evidence for compressionally induced high subsidence rates in the Kurile Basin (Okhotsk Sea) // *Tectonophysics*. 2002. V. 350. P. 63–97.

Bergal-Kuvikas O. Geochemical studies of volcanic rocks from the northern part of Kuril-Kamchatka arc: Tectonic and structural constraints on the origin and evolution of arc magma. Thesis for Doctor of Philosophy Hokkaido University. August, 2015. 191 p. <http://hdl.handle.net/2115/60073>

Birck J.L. Precision K-Rb-Sr isotopic analyses: application to Rb-Sr chronology // *Chemical Geol.* 1986. V. 56. Iss. 1–2. P. 73–83.

Cruz-Urbe A.M., Marshall H.R., Gaetani G.A. et al. Generation of alkaline magmas in subduction zones by partial melting of mélange diapirs – An experimental study Alkaline lavas occur globally in subduction-related volcanic arcs // *Geology*. 2018. V. 46. № 4. P. 343–346. <https://doi.org/10.1130/G39956.1>

Defant M.J., Drummond M.S. Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc // *Geology*. 1993. V. 21. № 6. P. 547–550.

Dreyer B.M., Morris J.D., Gill J.B. Incorporation of subducted slab-derived sediment and fluid in arc magmas: B-Be-¹⁰Be-ε_{Nd} systematics of the Kurile convergent margin, Russia // *J. Petrol.* 2010. V. 51. Is. 8. P. 1761–1782. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq038>

Edwards C.M.S., Menzies M.A., Thirlwall M.F. et al. The transition to potassic alkaline volcanism in Island Arcs: The Ringgit-Beser Complex, East Java, Indonesia // *J. Petrol.* 1994. V. 35. № 6. P. 1557–1595. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.6.1557>

Espinoza F., Morata D., Polvé M. et al. Bimodal back-arc alkaline magmatism after ridge subduction: Pliocene felsic rocks from Central Patagonia (47°S) // *Lithos*. 2008. V. 101. № 3. P. 191–217. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.002>

Falloon T.J., Danyushevsky L.V., Green D.H. Peridotite melting at 1 GPa: reversal experiments on partial melt compositions produced by peridotite-basalt sandwich experiments // *J. Petrol.* 2001. V. 42. P. 2363–2390

Gill J.B. Orogenic andesites and plate tectonics. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 392 p.

Guo Z., Wilson M., Zhang L. et al. The role of subduction channel mélanges and convergent subduction

systems in the petrogenesis of post-collisional K-rich mafic magmatism in NW Tibet // *Lithos*. 2014. V. 198–199. P. 184–201.

Gutiérrez F., Gioncadab A., González Ferrana O. et al. The Hudson Volcano and surrounding monogenetic centres (Chilean Patagonia): An example of volcanism associated with ridge–trench collision environment // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2005. V. 145. P. 207–233

Herzberg C. Identification of source lithology in the Hawaiian and Canary Islands: implications for origins // *J. Petrol.* 2011. V. 52. № 1. P. 113–146.

Imai N., Terashima S., Itoh S., Ando A. 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, Igneous rock series // *Geostandards Newsletter*. 1995. V. 19. № 2. P. 135–213.

Ingle S.G., Mahoney J.J., Chazey W. et al. Mechanisms of geochemical and geophysical variations along the western Galapagos Spreading Center // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2010. V. 11. Q04003. <https://doi.org/10.1029/2009GC002694>

Irvine T.N., Baragar W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // *Can. J. Earth Sci.* 1971. V. 8. P. 523–548.

Ishikawa T., Tera F. Source, composition and distribution of the fluid in the Kurile mantle wedge: Constraints from across-arc variations of B/Nb and B isotopes // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. V. 152. № 1–4. P. 123–138.

Ishizuka O., Taylor R.N., Milton J.A. et al. Variation in the mantle sources of the northern Izu arc with time and space – Constraints from high-precision Pb isotopes // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2006. V. 156. Iss. 3–4. P. 266–290.

Kayazar T.M., Nelson B.K., Bachmann O. et al. Deciphering petrogenic processes using Pb isotope ratios from time-series samples at Bezymianny and Klyuchevskoy volcanoes, Central Kamchatka Depression // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2014. V. 168. P. 1067. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1067-6>

Kelley K.A., Plank T., Newman S. et al. Mantle melting as a function of water content beneath the Mariana Arc // *J. Petrol.* 2010. V. 51. P. 1711–1738.

Kimura J.-I. Modeling chemical geodynamics of subduction zones using the Arc Basalt Simulator version 5 // *Geosphere*. 2017. V. 13. № 4. P. 992–1025. <https://doi.org/10.1130/GES01468.1>

Kimura J.-I., Gill J.B., Kunikiyo T. et al. Diverse magmatic effects of subducting a hot slab in SW Japan: Results from forward modeling // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2014. V. 15. P. 691–739. <https://doi.org/10.1002/2013GC005132>

Kimura J.-I., Sakuyama T., Miyazaki T. et al. Plume-stagnant slab-lithosphere interactions: Origin of

- the late Cenozoic intra-plate basalts on the East Eurasia margin // *Lithos*. 2018. V. 300–301. P. 227–249. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.12.003>
- Klein E.M., Langmuir C.H., Zindler A. et al. Isotope evidence of a mantle convection boundary of the Australian–Antarctic Discordance // *Nature*. 1988. V. 333. P. 623–629.
- Kogiso T., Hirose K., Takahashi E. Melting experiments on homogeneous mixtures of peridotite and basalt: application to the genesis of ocean island basalts // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1998. V. 162. P. 45–61.
- Kuno H. Petrology of Alaid volcano, north Kurile // *Japanese J. Geol. Geography*. 1935. V. 12. P. 153–162. <http://catalog.hathitrust.org/Record/000503403>
- Kushiro I. Partial melting of a fertile mantle peridotite at high pressures: An experimental study using aggregates of diamond // Eds. A. Basu, S.R. Hart. *Earth Processes: Reading Isotopic Code*. AGU Geophys. Monograph. 1996. V. 95. P. 109–122.
- Leeman W.P. Old/new subduction zone paradigms as seen from the Cascades // *Frontiers Earth Sci.* 2020. V. 8. P. 535–879. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.535879>
- Le Maitre R.W., Bateman P., Dudek A. et al. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Oxford: Blackwell, 1989.
- Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. et al. *Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press, 2002. 236 p.
- Li H.-Y., Ch. Xie, J.G. Ryan et al. Slab dehydration and magmatism in the Kurile arc as a function of depth: An investigation based on B-Sr-Nd-Hf isotopes // *Chemical Geol.* 2023a. 621121373. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121373>
- Li H.-Y., Ch. Xie, J.G. Ryan et al. Pb-Sr isotopes of the Kurile arc provide evidence for Indian-type oceanic crust in the Pacific basin // *Lithos*. 2023b. V. 448–449. 107174. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107174>
- Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins // *Amer. J. Sci.* 1974. V. 274. P. 321–355.
- Manhes G., Allegre C.J., Provost A. U-Th-Pb systematics of the eucrite “Juvinas”. Precise age determination and evidence for exotic lead // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1984. V. 48. № 12. P. 2247–2264.
- Marschall H.R., Schumacher J.C. Arc magmas sourced from mélange diapirs in subduction zones // *Nature Geosci.* 2012. V. 5. P. 862–867.
- Martynov A.Yu., Kimura J.-I., Martynov Yu.A., Rybun A.V. Geochemistry of late Cenozoic lavas on Kunashir Island, Kurile Arc // *Island Arc*. 2010. V. 19. Is. 1. P. 86–104.
- Maunder B., van Hunen J., Bouilhol P. et al. Modeling slab temperature: a reevaluation of the thermal parameter // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2019. V. 20. № 2. P. 673–687. <https://doi.org/10.1029/2018GC007641>
- Mori L., Gomez-Tuena A., Schaaf P. et al. Lithospheric removal as a trigger for flood basalt magmatism in the Trans-Mexican Volcanic Belt // *J. Petrol.* 2009. V. 50. P. 2157–2186.
- Moghadam H.S., Griffin W.L., Kirchenbaur M. et al. Roll-back, extension and mantle upwelling triggered eocene potassic magmatism in NW Iran // *J. Petrol.* 2018. V. 59. № 7. P. 1417–1465. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy067>
- Morgan J.P. Thermodynamics of pressure release melting of a veined plum pudding mantle // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2001. V. 2. № 4. Paper number 2000GC000049. <https://doi.org/10.1029/2000GC000049>
- Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins // *Amer. J. Sci.* 1974. V. 274. P. 321–355.
- Nebel O., Munker C., Nebel–Jacobsen Y.J. Hf–Nd–Pb isotope evidence from Permian arc rocks for the long-term presence of the Indian–Pacific mantle boundary in the SW Pacific // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.11.046>
- Nikulin A., Levin V., Carr M., Herzberg C. et al. Evidence for two upper mantle sources driving volcanism in Central Kamchatka // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. V. 321–322. P. 14–19.
- Peccherillo A., Taylor S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1976. V. 58. P. 63–81. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00384745>
- Pertermann M., Hirschmann M.M. Partial melting experiments on a MORB-like pyroxenite between 2 and 3 GPa: Constraints on the presence of pyroxenite in basalt source regions from solidus location and melting rate // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № B2. 2125. <https://doi.org/10.1029/2000JB000118>
- Plank T., Langmuir Ch.H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle // *Chemical Geol.* 1998. V. 145. P. 325–394.
- Portnyagin M., Bindeman I., Hoernle K. Geochemistry of primitive lavas of the Central Kamchatka Depression: magma generation at the edge of the Pacific Plate // *Geophysical Monograph*. 2007. V. 172. P. 199–239.
- Portnyagin M., Duggen S., Hauff F. et al. Geochemistry of the Late Holocene rocks from the Tolbachik volcanic field, Kamchatka: towards

- quantitative modelling of subduction-related open magmatic systems // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. V. 307. P. 133–155.
- Pearce J.A., Kempton P.D., Nowell G.M., Noble S.R. Hf-Nd element and isotope perspective on the nature and provenance of mantle and subduction components in western Pacific arc-basin systems // *J. Petrol.* 1999. V. 40. P. 1579–1611.
- Rehkamper M., Hofmann A.W. Recycled oceanic crust and sediment in Indian Ocean MORB // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. V. 147. P. 93–106.
- Rudge J.F., Reynolds B.C., Bourdon B. The double spike toolbox // *Chemical Geol.* 2009. V. 265. P. 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.05.010>
- Ryan J.G., Chauvel C. The subduction-zone filter and the impact of recycled materials on the evolution of the mantle // *Treatise on Geochemistry* (2nd Ed). 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00211-4>
- Sakuyama T., Tian W., Kimura J.-I. et al. Melting of dehydrated oceanic crust from the stagnant slab and of the hydrated mantle transition zone: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China // *Chemical Geol.* 2013. V. 359. P. 32–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.09.012>
- Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V. et al. The amount of recycled crust in sources of Mantle-Derived Melts // *Science.* 2007. V. 316. P. 412–417.
- Sorbadere F., Médard E., Laporte D. et al. Experimental melting of hydrous peridotite–pyroxenite mixed sources: Constraints on the genesis of silica-undersaturated magmas beneath volcanic arcs // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 384. P. 42–56.
- Stern C.R., Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. V. 123. P. 263–281.
- Stolper E., Newman S. The role of water in the petrogenesis of Mariana trough magmas // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1994. V. 121. № 3–4. P. 293–325.
- Straub S.M., Gomez-Tuena A., Zellmer G.F. et al. The processes of melt differentiation in arc volcanic rocks: insights from OIB-type arc magmas in the Central Mexican Volcanic Belt // *J. Petrol.* 2013. V. 54. № 4. P. 665–701. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs081>
- Syracuse E., Abers G. Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2006. V. 7. № 5. <https://doi.org/10.1029/2005GC001045>
- Syracuse E.M., van Keken P.E., Abers G.A. The global range of subduction zone thermal models // *Phys. Earth Planet. Int.* 2010. V. 183. № 1–2. P. 73–90.
- Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Eds. D. Saunders, M.J. Norry. *Magmatism in the Ocean Basins.* Geol. Soc. Special Publ. London. 1989. P. 313–345.
- Tanaka T., Togashi S., Kamioka H. et al. JNdi-1: a neodymium isotopic reference in consistency with La-Jolla neodymium // *Chemical Geol.* 2000. V. 168. P. 279–281.
- Tanakadate H. Taketomi-to, a new volcanic island in Chishima, Japan // *J. Japanese Association Mineral. Petrol. Econom. Geol.* 1935a. V. 1. № 1. P. 1–16.
- Tanakadate H. Chemical composition of coriaceous lavas which were effused from Io-jima, Kagoshima Prefecture and Taketomi-jima, Chishima: Ganseki Kōbutsu Kōshōgaku // *J. Japanese Association Mineral. Petrol. Econom. Geol.* 1935b. V. 14. № 1. P. 36–38. https://www.jstage.jst.go.jp/article/ganko1929/14/1/14_1_36/_article/-char/ja/
- Tanakadate H. Morphological development of the volcanic islet Taketomi in the Kuriles // *Proc. Jap. Acad.* 1942. V. 10. № 8. P. 494–497.
- Tanakadate H., Kuno H. The volcanological and petrographical note of the Taketomi Islet in the Kuriles // *Proceedings of the Imperial Academy.* 1935. V. 11. № 4. P. 155–157.
- Tatsumi Y. The subduction factory: How it operates in the evolving Earth // *GSA Today: Publ. Geol. Soc. Amer.* 2005. V. 15. P. 4–10. <https://doi.org/10.1130-1052-5173015>
- Till C.B., Grove T.L., Withers A.C. The beginnings of hydrous mantle wedge melting // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2012. V. 163. P. 669–688.
- Tollstrup D.L., Gill J.A., Kent A. et al. Across-arc geochemical trends in the Izu-Bonin arc: Contributions from the subducting slab, revisited // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2010. V. 11. <https://doi.org/10.1029/2009GC002847>
- van Keken P.E., Hacker B.R., Syracuse E.M. et al. Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H₂O from subducting slabs worldwide // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. 1–15. B1. <https://doi.org/10.1029/2010JB007922>
- Varekamp J.C., Hesse A., Mandeville C.W. Back-arc basalts from the Loncopue graben (Province of Neuquen, Argentina) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2010. V. 197. № 1–4. P. 313–328.
- Verma S.P. Continental rift setting for the central part of the Mexican Volcanic Belt: A statistical approach // *Open Geol. J.* 2009. V. 3. P. 8–29.
- Volynets A., Churikova T., Wörner G. et al. Mafic Late Miocene–Quaternary volcanic rocks in the Kamchatka back arc region: implications for subduction geometry and slab history at the Pacific-Aleutian junction // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2010. V. 159. № 5. P. 659–687.

Yang Y.-H., Chu Zh.Y., Wu F.-Y. et al. Precise and accurate determination of Sm, Nd concentrations and Nd isotopic compositions in geological samples by MC-ICP-MS // J. Anal. At. Spectrom. 2011. V. 26. P. 1237–1244. <https://doi.org/10.1039/c1ja00001b>

Yücel C., Arslan M., Temizel İ. et al. Evolution of K-rich magmas derived from a net veined lithospheric mantle in an ongoing extensional setting:

Geochronology and geochemistry of Eocene and Miocene volcanic rocks from Eastern Pontides (Turkey) // Gondwana Res. 2017. V. 45. P. 65–86.

Wang Q., Wyman D. A., Xu J. et al. Eocene melting of subducting continental crust and early uplifting of central Tibet: Evidence from central-western Qiangtang high-K calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 272. P. 158–171.

Potassium Alkaline Volcanism of Alaid Volcano, Kuril Islands: the Role of Subduction Melange in Magmogenesis

Yu. A. Martynov¹, V. A. Rashidov², S. I. Dril³

¹Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

²Institute of Volcanology and Seismology, Far Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

³Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

New data are presented on the contents of major elements and trace elements, Sr-Nd-Pb isotopes in the Holocene high-potassium basic lavas of the Alaid volcano, located in the north of the Kuril island arc in the junction zone with the Kamchatka volcanic segment. According to petrochemical criteria, two groups of coeval rocks are distinguished: Ne-normative shoshonites and high-potassium subalkaline basalts, which are similar to each other in a number of geochemical characteristics. Chondrite-normalized REE distribution spectra show enrichment in LREE, with flat HREE distribution spectra, and the absence of Eu and Ce anomalies. MORB-normalized incoherent element concentrations show LILE enrichment and a well-defined negative Ta-Nb-Ti anomaly typical of suprasubduction volcanics. High K₂O/Rb and Rb/Sr ratios indicate the presence of biotite and amphibole in the magmatic source, while low Sr/Y ratios and flat distribution spectra of medium and heavy lanthanides indicate the absence of garnet in the restite paragenesis. Significant variations in the contents of macro- and microcomponents at similar MgO concentrations indicate a heterogeneous magmatic source, and taking into account linear mixing trends in isotope and discrimination diagrams, experimental data, suggest the involvement in magmogenesis of not only the peridotite mantle, but also amphibole-clinopyroxene mineral paragenesis. An analysis of the literature data shows that in «cold» island arcs, manifestations of potassium alkaline magmatism are often, if not in all cases, associated with local extension zones. Since such zones are associated with the adiabatic rise of a hot and plastic asthenosphere, it can be assumed that subduction melange formed along the boundary of the slab and supra-subduction mantle, consisting of hydrated fragments of ultrabasites and metamorphosed oceanic crust transformed into amphibole-bearing pyroxenites, was involved in the melting. This mechanism makes it possible to logically explain the geochemical and isotopic features of the anomalous alkaline magmatism of the Kuril island arc and the connection with the anomalous tectonics of its northern segment. The results obtained may be important in discussing the genesis of potassium alkaline magmas manifested in subduction geodynamic settings.

Keywords: Alaid volcano, Kuril Islands, potassium alkaline volcanism, subduction melange