

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЯВЛЕНИЙ ВУЛКАНИЗМА ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

С.А. Рылова¹, О.В. Бергаль-Кувикас^{1,2}

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

²*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия;
e-mail: kuvikas@mail.ru*

Поступила в редакцию 14 ноября 2025 г.

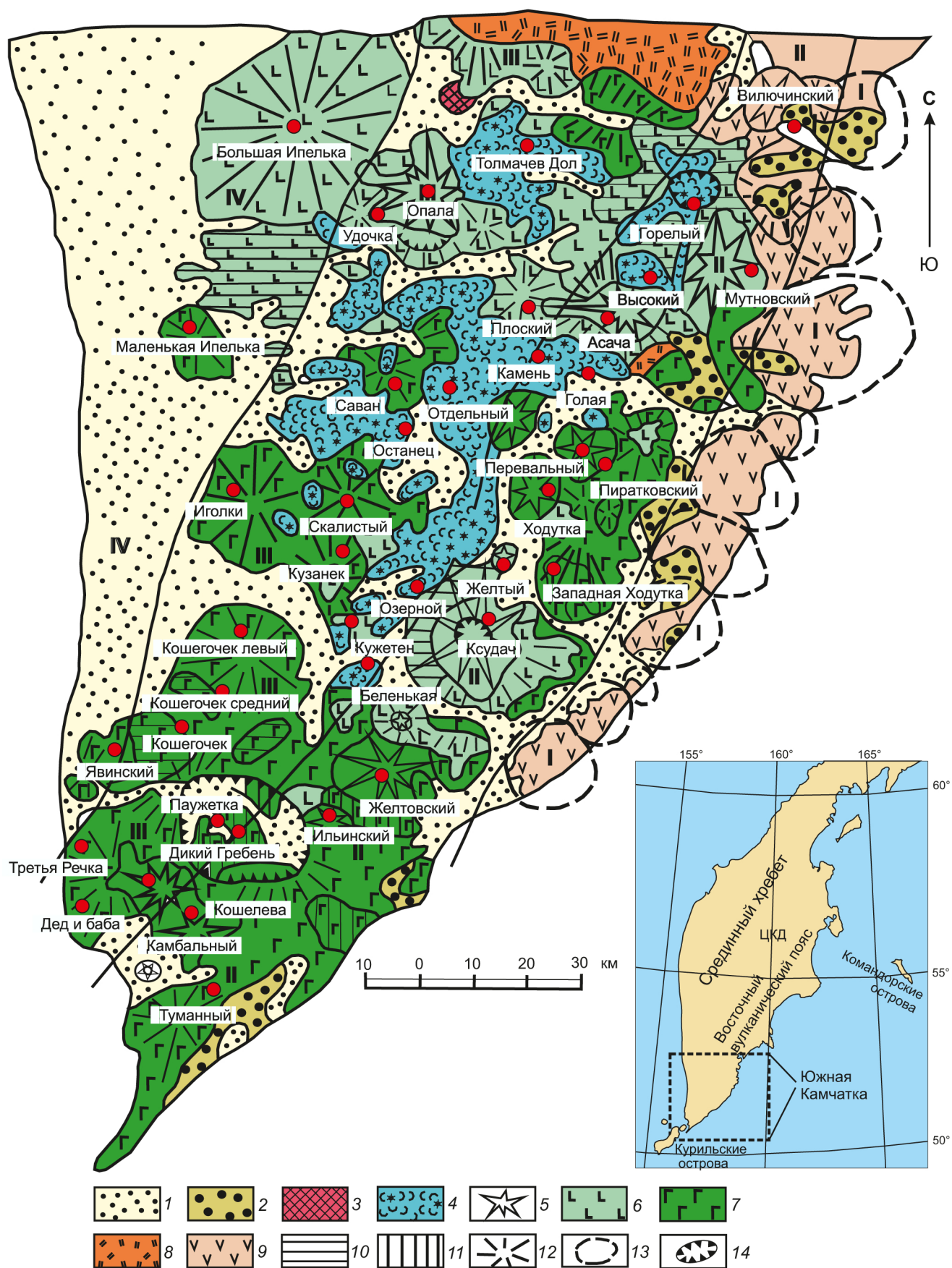
На основе сопоставления типов вулканов, объемов изверженного материала, геохимических характеристик магм и параметров земной коры проведен анализ проявлений вулканизма Южной Камчатки. Комплексные вулканические структуры, образованные несколькими сближенными вершинами, и объемные щитовые вулканы неоген-эоплейстоценового возраста локализованы в тылу дуги, на расстоянии ~273–283 км от современного глубоководного желоба. Активный вулканический пояс расположен на расстоянии ~200–225 км от глубоководного желоба и характеризуется преобладанием кальдерных и комплексных вулканов. В неоплейстоцен-голоцене фиксируется существование ареального моногенного вулканизма в диапазоне ~207–275 км от глубоководного желоба, что, возможно, свидетельствует об активных процессах растяжения вкрест простирания дуги. Сосуществование кислого и основного магматизма в современном активном вулканическом поясе указывает на подпитку кислых магматических очагов кальдерных комплексов Южной Камчатки основными магмами. Геохимическая зональность вкрест простирания дуги по несовместимым некогерентным элементам выражена слабо, что отличает Южную Камчатку от Восточного вулканического пояса и Северных Курильских островов. Выявленные пространственно-временные характеристики свидетельствуют об усложненных процессах формирования магм вулканов Южной Камчатки относительно других сегментов Курило-Камчатской островной дуги.

Ключевые слова: типы вулканических структур, геохимическая зональность, слэб, зона субдукции, Южная Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Южная Камчатка, от Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций на севере и до мыса Лопатки на юге, образует переход от Камчатского сегмента Курило-Камчатской островной дуги к ее Курильскому сегменту (рис. 1) [6]. В основании Южной Камчатки находятся терригенные отложения мезозойского возраста и прибрежный вулканический комплекс миоценового возраста. Прибрежный комплекс в большей части сложен многочисленными интрузивами, выведенными на земную поверхность [8]. В отличие от аккретированных к Камчатке террейнов к северу от Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций, прибрежный комплекс сформировался приблизительно на широте, близкой к современной [31]. Южная Камчатка представляет собой весьма сложную по структуре и типам вулканизма область, которая приурочена к сочленению трех крупных вул-

канических поясов Курило-Камчатского региона – Срединно-Камчатского, Восточного вулканического пояса и Курило-Камчатского или Южно-Камчатского [13]. Специфика вулканизма на Южной Камчатке обусловлена совмещением или наложением особенностей, присущих вулканизму названных выше вулканических зон, имеющих разную историю формирования [2]. Ранее особенности проявления вулканизма были хорошо изучены для траверса вкрест Восточного, Срединно-Камчатского вулканических поясов и зоны вулканизма Центральной Камчатской депрессии [25, 39]. Некоторые публикации посвящены изучению отдельных вулканов Южной Камчатки, таких как Мутновский [26, 35], Горелый [28, 34], Опала [19], Курильского озера [15], кальдера Паужетка [23] и Карымшина [12]. В монографии [13] предпринята попытка систематизации временных интервалов проявления вулканизма.



Ранее исследование пространственно-временных характеристик проявлений вулканизма Южной Камчатки позволило предположить смещение гидротермальной и вулканической деятельности к северо-востоку, однако механизм, формирующий данный феномен, не был определен [11].

В данной работе представлен анализ пространственного проявления вулканизма Южной Камчатки на основе геолого-геофизического положения отдельных вулканических центров относительно погружающейся плиты (слэба), морфометрических данных отдельных вулканических центров. Собраны опубликованные данные геохимических характеристик. Южно-Камчатский вулканический пояс является интересным примером геодинамической эволюции магматизма на активной окраине континента.

Цели работы – (1) описание вулканизма на основе компиляции имеющихся данных о вулканических формах Южной Камчатки, (2) сравнение геолого-геофизических параметров вулканизма с характеристиками вулканизма других сегментов Камчатки и Курильской островной дуги, (3) идентификация специфических процессов, формирующих проявление вулканизма Южной Камчатки.

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ

В ходе работ был сформирован список вулканов Южной Камчатки, как действующих, так и потухших. В него попали 92 вулканические постройки. Главные характеристики, которые приводятся в базе данных: основное и альтернативное название вулкана, идентификационный номер, который используется для многих баз данных, относительный возраст, географические координаты, высота постройки, его приуроченность к определенной тектонической обстановке, состав главных представительных пород по данным программы Британской геологической службы VOGRIPA [38] (Volcano Global Risk Identification & Analysis Project и GVP Global Volcanism Program [27], исследовательской программы Смитсоновского института, США). Морфометрические параметры вулканизма, такие как объем вулканической постройки и объем извергнутого материала, заимствованы из публикаций [13, 21, 23]. Пространственное положение

вулканической постройки относительно глубоководного желоба, расстояние до желоба приведены по данным собственных измерений в интерактивной программе Google Earth. К сожалению, полученные данные не в полной мере характеризуют все вулканы, для тех или иных построек не хватает данных для дальнейшей систематической обработки и их дальнейшей интерпретации. Таким образом, были выбраны данные по 43 вулканам, которые максимально возможно охарактеризуют как сами постройки, так и происходящие процессы, связанные с их вулканической деятельностью.

Для описания петрологических особенностей вулканизма Южной Камчатки были использованы образцы пород наиболее представительных вулканических построек: Большая Ипелька, Опала, Горелый, Мутновский, Асача, Ходутка, Саван, Большие и Маленькие Иголки, Ксудач, Желтовский, Ильинский, Кошелевский, Камбальный, Дикий Гребень, Явинский, Третья Речка, Дед и Баба, Паужетка [13]. Также были привлечены данные по Мутновскому [26] и Горелому [34] вулканам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Временные интервалы и распространение вулканизма в зависимости от расстояния до желоба

Начало четвертичного вулканизма на Южной Камчатке приурочено к щитовым вулканам неоген-эоплейстоценового возраста ($N_2^3-Q_1$), которые сформировались примерно в 201–283 км от оси глубоководного желоба (рис. 2). Из них выделяется вулкан Большая Ипелька – один из самых крупных вулканов Камчатки. Он расположен в глубоком тылу дуги, примерно в 283 км от глубоководного желоба. За ним появляются стратовулканы Явинский и Кошелева (как самостоятельная постройка).

С эоплейстоцена начинают формироваться различные по типу вулканы. Вулканические комплексы представлены Асачей и Малой Ипелькой. Мощные кальдерообразующие извержения происходят на кальдерах Опала и Карымшина [21]. Некоторые вулканы активизировались в позднем эоплейстоцене, активность некоторых продолжалась вплоть до голоцена

Рис. 1. Карта-схема магматических формаций Южной Камчатки, включающая вулcano-структурное районирование (по данным [18], с изменениями и дополнениями).

На врезке: показано (контур штрих-линией) положение региона исследования. Обозначены (римские цифры) вулканические цепи: I – Ахотенская; II – Ильинская; III – Гольгинская; IV – Явинская. Терригенные отложения: 1 – антропогенные, 2 – олигоцен-миоценовые, 3 – мезозойские; магматические формации: 4 – базальтовая голоценовая (ареального вулканизма), 5 – андезито-базальтовая плейстоценовая (стратовулканов), 6 – базальтовая раннеплейстоценовая, 7 – андезито-базальтовая плиоценовая, 8 – дацитовая миоцен-плиоценовая, 9 – андезитовая миоценовая; фазы формаций: 10 – поздние, 11 – ранние; 12 – миоцен-раннечетвертичные аппараты; 13 – условные границы миоценовых комплексов; 14 – кальдеры.

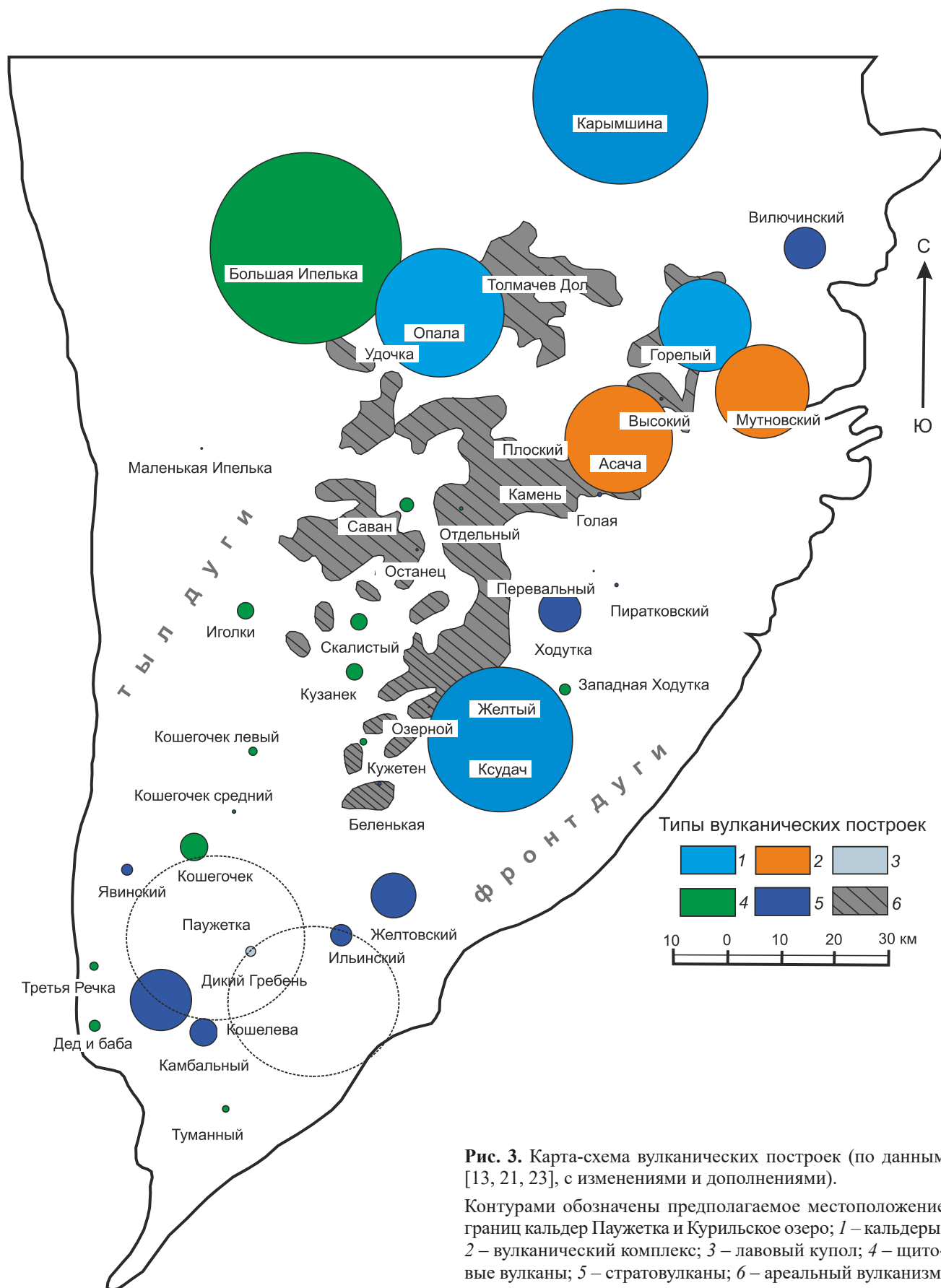


Рис. 3. Карта-схема вулканических построек (по данным [13, 21, 23], с изменениями и дополнениями).

Контурами обозначены предполагаемое местоположение границ кальдер Паужетка и Курильское озеро; 1 – кальдеры; 2 – вулканический комплекс; 3 – лавовый купол; 4 – щитовые вулканы; 5 – стратовулканы; 6 – ареальный вулканизм.

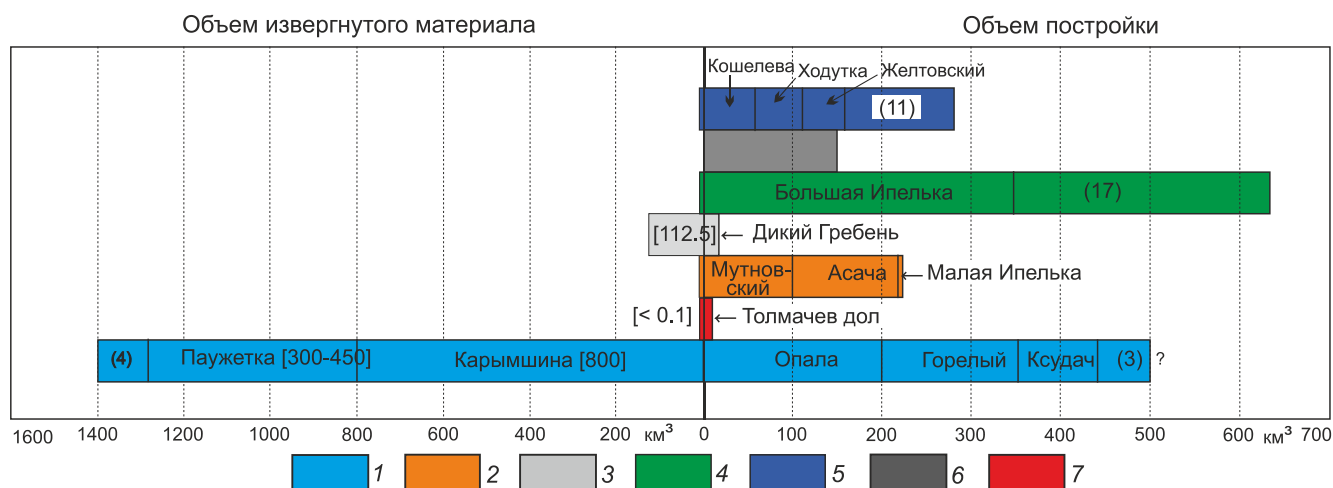


Рис. 4. График отношения объемов вулканических построек к объему извергнутого материала в зависимости от типа построек.

1 – кальдеры; 2 – вулканический комплекс; 3 – лавовый купол; 4 – щитовые вулканы; 5 – стратовулканы; 6 – ареальный вулканизм; 7 – шлаковый конус.

Примечание. Обозначено: (17) количество вулканов, относящихся к определенной группе (арабские цифры в круглых скобках); [112.5] объем (км³) извергнутого материала при крупных и катастрофических извержениях (арабские цифры в квадратных скобках).

всех вулканических построек вносят щитовые вулканы (634 км³), кальдеры, стратовулканы и ареальный вулканизм, немногим уступающий комплексным постройкам вулканов Мутновский (100 км³), Асача (120 км³) и Малая Ипелька (3 км³). Меньшие объемы характерны для лавового купола Дикого Гребня (18 км³) и шлакового конуса Толмачева дола (10 км³).

Суммарный объем построек кальдер составляет не менее 450 км³, каждый представитель данной группы вносит приблизительно равный вклад. Напротив, график объемов выброшенного материала свидетельствует о значительно больших масштабах и составляет более 1400 км³. Самыми внушительными объемами извергнутого материала в стадии кальдерообразования выделяются кальдеры Карымшина (800 км³) [12], Паужетская вулcano-тектоническая структура (300–450 км³) [21, 23]. Среди щитовых вулканов крупнейший вклад в объемы построек такого типа привносит вулкан Большая Ипелька (350 км³), на остальные выделяемые щитовые вулканы (17 наименований) приходится оставшийся объем – 284 км³. Объем вулканических построек стратовулканов находится в пределах 281 км³, причем большую долю из них образуют вулканы Кошелева (60 км³), Ходутка (55 км³), Желтовский (45 км³), а на остальные вулканические постройки (10 наименований) приходится 121 км³. Вклад стратовулканов в эксплозивную деятельность Южной Камчатки незначителен (менее 0.1 км³).

Таким образом, анализ пространственно-временного проявления вулканизма Южной Камчатки

свидетельствует о том, что в четвертичное время наиболее древние вулканические комплексы были распространены на значительном удалении от глубоководного желоба. Со временем вулканизм мигрировал в сторону фронта дуги, где в плейстоцен-голоценовое время доминировали мощные кальдерообразующие извержения. Моногенный ареальный вулканизм существовал в течение длительного периода времени как на фронте дуги, так и к западу от него, в промежуточной зоне.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЯВЛЕНИЯ ВУЛКАНИЗМА СО СТРУКТУРОЙ КОРЫ

Мощность земной коры на Южной Камчатке изменяется от 24 до 34 км [14] (рис. 5). При этом устанавливается резкое различие в мощности коры и рельефа ее подошвы в западных и восточных районах полуострова. Для восточного и южного участков характерны пониженные значения мощности (от 24 до 30 км). Минимальные глубины залегания подошвы коры приурочены непосредственно к восточному побережью (рис. 5).

Интересные закономерности были обнаружены при сопоставлении карты мощности земной коры и схемы новейшей тектоники Южной Камчатки (рис. 5). На фронтальной части исследуемого региона относительно глубоководного желоба мы наблюдаем рост поднятий 0.2–1.0 км вдоль восточного побережья с одновременными максимально низкими мощностями коры. Зеркально противоположную картину мы

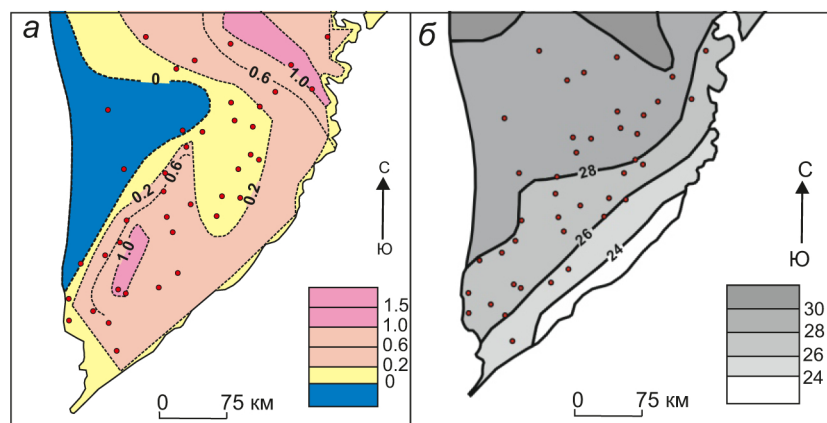


Рис. 5. Карта-схема новейшей тектоники Южной Камчатки с отображением изолиний новейших поднятий (км) (а), по данным [17]); мощность земной коры Южной Камчатки (км) (б), по данным [14].

На обоих рисунках красными точками нанесены исследованные нами вулканы.

наблюдаем в зоне тыла (западная часть Южной Камчатки). С уменьшением поднятий до 0 км, происходит увеличение мощности земной коры до более 28 км.

В голоцене на Южной Камчатке неоднократно происходили мощные эксплозивные извержения [23]. В то же время фиксируются многочисленные шлаковые конусы ареального моногенного вулканизма (рис. 2), свидетельствующие о доминировании условий растяжения. По соотношениям геологических формаций С.Е. Апрельковым и др. [3] было выдвинуто предположение о доминировании обстановки растяжения на протяжении всего кайнозоя. Е.А. Зелениным [10] на основе дешифрирования космических снимков было показано, что позднечетвертичные разломы Южной Камчатки имеют сбросовую кинематику, а магмопроводящие трещины ориентированы вдоль оси полуострова, что свидетельствует о современном поперечном растяжении территории. Средняя скорость деформаций не превышает 1.6 мм/год [10]. Проявление основных магм шлаковых моногенных конусов наряду с проявлением кислого вулканизма может свидетельствовать о деламинации коры [24, 32]. На основе изотопно-геохимического анализа разновозрастных серий пород кальдеры Карымшина было показано, что деламинация коры и внедрение основных магм в кислый очаг могло формировать мощные серии извержений суперкальдеры [22]. Наличие кальдерообразующих извержений отличают Южную Камчатку от других сегментов Курило-Камчатской островной дуги [7, 9].

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВУЛКАНИЗМА

Для описания отношения петрогенных оксидов к кремнезему были использованы данные по 4 элементам: калий, магний, титан и алюминий (рис. 6). По содержанию кремнезема все исследуемые образцы соответствуют породам от основного до кислого состава (от 45.75 до 77.48 мас. % SiO_2). Содержание оксида

калия распределено в породах следующим образом: в кальдерах от 0.62 до 3.61 мас. %, в комплексных постройках от 0.14 до 3.9 мас. %, в лавовых куполах от 0.98 до 3.09 мас. %, в щитовых вулканах от 0.97 до 2.3 мас. %, в стратовулканах от 0 до 4.42 мас. %, в ареальной зоне от 0.13 до 3.5 мас. %. Содержание оксида магния в образцах имеет следующее распределение: в кальдерах от 0 до 9.22 мас. %, в комплексных постройках от 0.48 до 8.5 мас. %, в лавовых куполах от 0.87 до 5.18 мас. %, в щитовых вулканах от 1.16 до 8.66 мас. %, в стратовулканах от 0.95 до 8.43 мас. %, в ареальной зоне от 3.23 до 9.09 мас. %. Распределение оксида титана следующее: в кальдерах от 0.03 до 1.45 мас. %, в комплексных постройках от 0.3 до 1.48 мас. %, в лавовых куполах от 0.07 до 1.08 мас. %, в щитовых вулканах от 0.53 до 1.51 мас. %, в стратовулканах от 0 до 1.26 мас. %, в ареальной зоне от 0.4 до 1.2 мас. %. Содержание оксида алюминия распределено следующим образом: в кальдерах от 7.14 до 20.92 мас. %, в комплексных постройках от 13.93 до 23 мас. %, в лавовых куполах от 13.7 до 18.62 мас. %, в щитовых вулканах от 15.66 до 22.15 мас. %, в стратовулканах от 13.61 до 24.11 мас. %, в ареальной зоне от 16.54 до 21.03 мас. %.

Также были построены графики отношения содержания петрогенных оксидов кремния, магния, калия и титана в породах различных вулканических построек Южной Камчатки к их пространственному положению относительно глубоководного желоба (рис. 7). На графике содержания кремнезема в породах различных типов вулканических построек относительно их удаления от глубоководного желоба, как уже упоминалось ранее, изменения происходят в пределах от 45.75 до 77.48 мас. %.

В породах щитовых вулканов (зеленый цвет) происходит небольшое увеличение содержания оксида кремния от тыла к фронту: минимальные значения от 48.48 до 49.51 мас. %, а максимальные значения

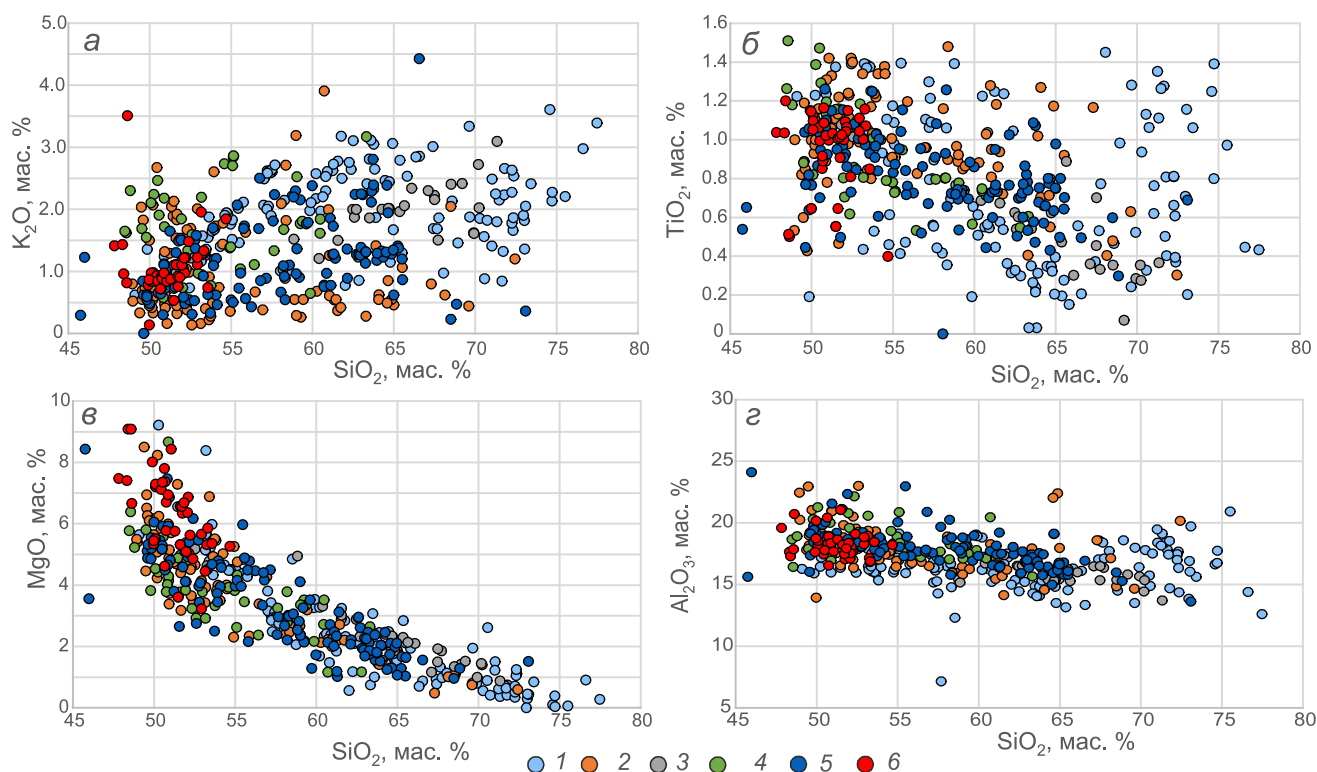


Рис. 6. Графики отношения петрогенных оксидов калия (а), титана (б), магния (в) и алюминия (г) к кремнезему.
1 – кальдеры; 2 – вулканический комплекс; 3 – лавовый купол; 4 – щитовые вулканы; 5 – стратовулканы; 6 – ареальный вулканизм.

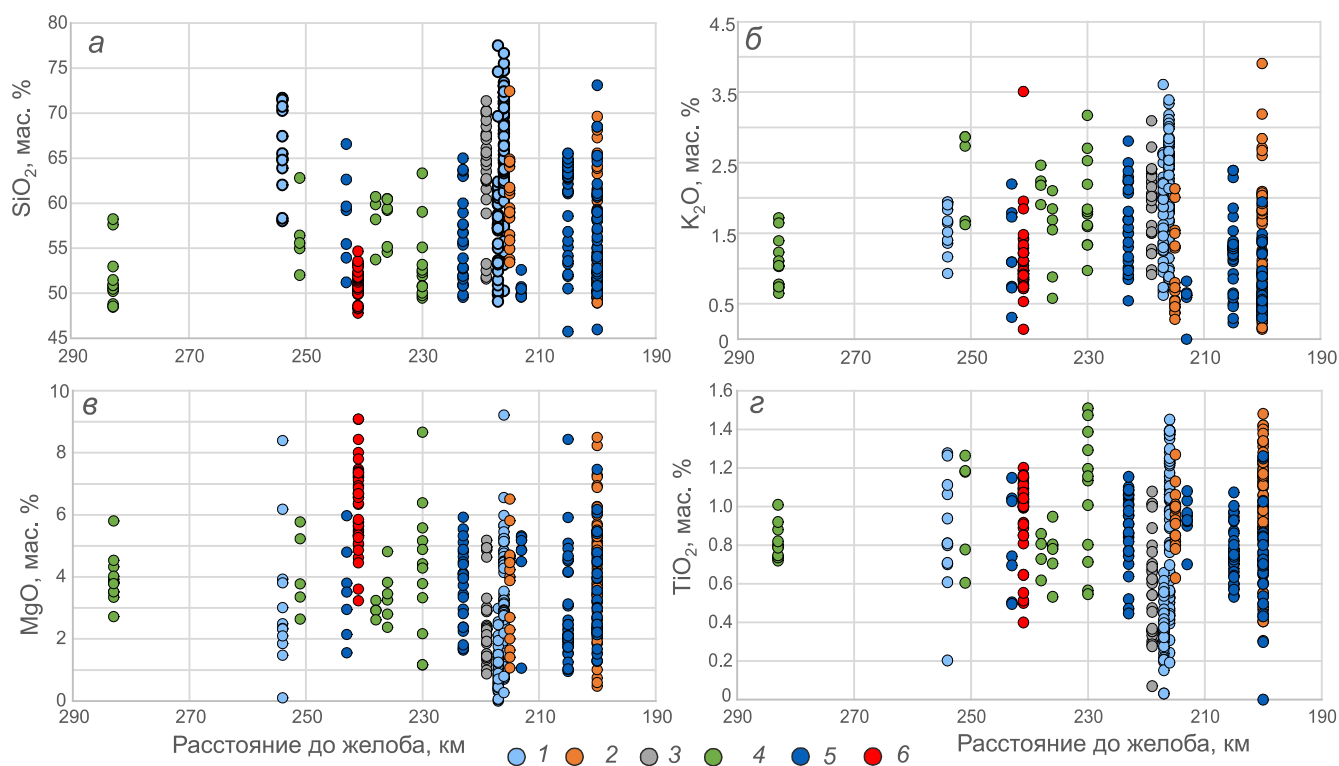


Рис. 7. Графики отношения содержания петрогенных оксидов (SiO_2 – (а), K_2O – (б), MgO – (в), TiO_2 – (г) в породах разных типов вулканов к пространственному положению вулканов относительно Тихоокеанского глубоководного желоба.
1 – кальдеры; 2 – вулканический комплекс; 3 – лавовый купол; 4 – щитовые вулканы; 5 – стратовулканы; 6 – ареальный вулканизм.

варьируют в диапазоне от 58.24 до 63.32 мас. %. Содержание кремнезема в породах кальдер занимают промежуточное положение относительно удаления от глубоководного желоба; для вулкана Опала, находящегося на расстоянии 254 км от желоба, содержания SiO_2 изменяются в пределах от 58 до 74.58 мас. %. Паужетская вулcano-тектоническая структура и кальдера вулкана Горелый приблизительно равноудалены от желоба, и диапазон содержания кремнекислоты варьируется от 49.10 до 77.48 мас. %. Это самый вариабельный представитель вулканических построек на Южной Камчатке, приближенный к фронту дуги. Содержание SiO_2 в породах классических стратовулканов распределены почти равномерно, начиная от центральной части к фронту дуги. Диапазон содержания кремнекислоты сильно не изменяется и варьируется от 45.75 до 73.10 мас. %. Сложные вулканические постройки комплексного типа таких вулканов, как Асача и Мутновский, расположены близко к глубоководному желобу, и диапазон содержания оксида кремния в них изменяется от 48.94 до 72.43 мас. %. Примечательно, что комплексные вулканы не встречаются ни в центральной части Южной Камчатки, ни в тылу дуги. Один представитель вулканической постройки типа лавовый купол – вулкан Дикий Гребень – имеет также обширный диапазон содержания кремнекислоты, который варьируется в пределах от 51.63 до 71.34 мас. %. Территория ареального вулканизма не имеет четких границ распространения в пределах изучаемой территории, поэтому этот тип вулканизма на рис. 7 показан усреднено на расстоянии 241 км от глубоководного желоба. Содержание кремнекислоты для этого вулканического типа варьируется от 47.83 до 54.68 мас. %.

На графиках содержание оксида магния в разных типах вулканических построек распределилось следующим образом. В образцах щитовых вулканов с переходом от тыла к центральной части происходит уменьшение диапазона содержания оксида магния: в образцах пород вулкана Большая Ипелька содержание оксида изменяется от 1.16 до 8.67 мас. %, в остальных вулканах этого типа – в пределах от 2.38 до 5.81 мас. %. Для пород изучаемых кальдер Южной Камчатки характерен широкий диапазон изменения оксида магния от 0.10 до 8.39 мас. % в центральной части и от 0 до 9.22 мас. % ближе к фронту. Содержание оксида магния в образцах пород стратовулканов незначительно увеличивается к фронту дуги. Так, диапазон значений, характеризующих стратовулканы, в тылу дуги варьирует от 1.56 до 5.97 мас. %, а ближе к фронту изменяется от 1.06 до 8.44 мас. %. В образцах пород вулканов комплексного типа диапазон также обширен: от 0.48 до 8.5 мас. %. Для лав лавового

купола вулкана Дикий Гребень, содержание оксида магния не сильно отличается от содержаний в породах других вулканических построек и варьируется в пределах от 0.88 до 5.18 мас. %. Содержание оксида магния в образцах ареального вулканизма несколько отличается от такового в породах других вулканов исследуемой территории, имеет диапазон значений от 3.23 до 9.08 мас. %, что выглядит немного повышенным по отношению к другим образцам из промежуточной части дуги.

На графиках содержания оксида калия в образцах изучаемых пород Южной Камчатки видно небольшое увеличение его концентраций от тыла к фронту дуги. Для щитовых вулканов происходит увеличение содержания мас. % от 0.65–1.72 до 0.58–3.17. Для кальдер просматривается та же тенденция в изменении от 0.93–1.94 до 0.62–3.61 мас. %. Содержание оксида калия в образцах пород стратовулканов немного повышено в промежуточной части вулканического пояса Южной Камчатки (от 0.31–2.20 до 0.54–2.81 мас. %) и понижено ближе к фронту дуги (от 0 до 2.29 мас. %). В образцах пород вулканов комплексного типа происходит увеличение содержания оксида калия: от 0.28–2.13 мас. % до 0.14–3.90 мас. %. Для вулканических построек типа лавового купола значения концентрации средние и варьируются в пределах от 0.92 до 3.09 мас. %. Содержание оксида калия в образцах пород ареального вулканизма несколько меньше, чем в других образцах пород центральной части Южной Камчатки и варьируются в пределах от 0.14 до 1.95 мас. % (выделяется лишь один образец с содержанием 3.51 мас. %).

На графиках содержания оксида титана в образцах изучаемых пород также видна тенденция к увеличению от тыла к фронту. Для пород щитовых вулканов происходит увеличение значений в пределах от 0.72–1.01 до 0.53–1.51 мас. %. Для пород кальдер Южной Камчатки характерен широкий диапазон содержаний оксида титана: 0.2–1.28 мас. % в центральной части и 0.03–1.45 мас. % во фронтальной части. Содержание оксида титана в образцах пород стратовулканов с изменением положения от тыла к фронту сильно не изменяется и варьируется в диапазоне от 0.45 до 1.15 с некоторыми отклонениями во фронтальной части (единичные значения от min 0 и max 1.25 мас. %). В образцах пород вулканов комплексного типа происходит увеличение значений: от 0.63–1.27 мас. % до 0.41–1.48 мас. %. В целом содержание оксида титана в породах комплексных построек несколько выше, чем в образцах других типов вулканических построек. Для лавового купола концентрации оксида титана варьируют в диапазоне от 0.07 до 1.08 мас. %. Содержание оксида титана в образцах пород ареального

Таблица. Сравнение проявлений вулканизма, геофизических параметров слэба и характеристик земной коры вдоль северной части Курило-Камчатской островной дуги. Локализация сравниваемых зона показана на рис. 1.

Характеристики \ Изучаемая зона	Восточный вулканический пояс	Южная Камчатка	Северные Курилы
Возраст начала формирования вулканизма	$N^3_1-N_2$	N-Q	P-N ₁
Расстояние вулканов от желоба (км)	213–230	198–283	183–260
Мощность земной коры (км)	24–32	24–30	20–24
Угол погружения слэба (°)	25–44	44–50	41–43
Глубина землетрясений в сейсмофокальной зоне (км)	350	482	500
Возраст слэба (млн лет)	89–92	100–105	106–107

Примечание. Данные были взяты из следующих источников: [1, 5–7, 14, 16, 20, 28, 36].

вулканизма находятся в среднем диапазоне (от 0.40 до 1.20 мас. %) и не отличаются от таковых в породах других типов вулканов Южной Камчатки.

Сравнительный анализ геохимических данных по вулканам Южной Камчатки свидетельствует о широких диапазонах вариаций состава пород отдельных типов вулканов, скорее всего, обусловленных сложной эволюцией магм. Изменения содержаний петрогенных оксидов не зависят от расстояний до глубоководного желоба, соответственно, отсутствует прямая связь со слэбом – это указывает на усложненные условия формирования магм в субдукционной обстановке.

СРАВНЕНИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ВУЛКАНИЗМА ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ С ВУЛКАНИЗМОМ ДРУГИХ СЕГМЕНТОВ КУРИЛО- КАМЧАТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

Параметры слэба от Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций до Северных Курил отличаются незначительно: постепенно увеличивается возраст слэба с севера на юг, что коррелируют с максимальным углом наклона слэба и наиболее глубокими землетрясениями под Южной Камчаткой и Северными Курилами (табл.). Самая широкая часть пояса включает вулканы Большая Ипелька и Опала, Толмачева Дола и вулкан Вилучинский (рис. 1) и частично на Северных Курилах, что, возможно, объясняется погружением подводной горы со смещением зоны магмогенерации к тылу дуги [6].

Наибольшая мощность земной коры фиксируется под Восточным вулканическим поясом, возраст проявления вулканизма в нем – позднемiocен-плиоценовый (табл.). Возможно, аккреция Кроноцкой палеодуги и перескок зоны субдукции образует усложненную структуру земной коры севернее Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций. Минимальная

мощность земной коры характерна для Северных Курил. Переходные характеристики мощности земной коры наблюдаются на Южной Камчатке, хотя временные интервалы образования магм здесь одни из наиболее древних в сравниваемых сегментах дуги (табл.).

Геохимическая зональность вкост простирания дуги является важным параметром процессов, происходящих над слэбом. От фронта к тылу дуги наблюдается обогащение крупными литофильными элементами с большими ионными радиусами и деплегация немобильными, высокозарядными элементами [29, 33, 37]. Ранее для северного сегмента Камчатки было показано, что уменьшение парциального плавления от фронта к тылу дуги и добавка обогащенного мантийного компонента типа OIB контролирует разнообразие магм [25]. На примере изучения вулканов Корякский и Авачинский, находящихся на южном окончании Восточного вулканического пояса, были показаны геохимические вариации магм вкост простирания зоны субдукции [30]. Вулканы Северных Курил также имеют вариации магм, зависящие от слэба [4]. Исходя из графиков состава магм в зависимости от расстояния до желоба, для Южной Камчатки не прослеживаются явные вариации в содержании некогерентных элементов, в частности калия (рис. 7). Сравнение сегментов дуги позволяет сделать вывод, что Южная Камчатка отличается одним из наиболее древних проявлений вулканизма в северной части Курильского сегмента Курило-Камчатской островной дуги. Классические геохимические зональности вкост простирания дуги не наблюдаются, либо проявляются незначительно. Вышеперечисленные факты позволяют предположить более сложные процессы магмогенерации на юге Камчатки, отличающейся от таковой Восточного вулканического пояса и Северных Курил.

ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты сопоставления возраста формирования вулканических структур, химического состава магм, геофизических характеристик земной коры и сравнение параметров слэба под сегментами Южной Камчатки, Восточного вулканического пояса и Северных Курил. Вулканы раннего этапа магматизма в основном расположены в тылу дуги (за исключением вулкана Туманного, который расположен вблизи современного фронта дуги) и характеризуются базальтовым составом магм, сформировавших объемные щитовые постройки. Современный вулканизм концентрирован на фронте дуги при минимальной мощности земной коры и воздымании фундамента. Наряду с кальдерами сосуществуют стратовулканы, проявляющие активность в голоцене. Ареальный моногенный вулканизм маркирует растяжение на всем временном интервале существования дуги Южной Камчатки. Геохимическая зональность вкрест простираения дуги выражена слабо. Пространственно-временные характеристики проявления вулканизма и геохимические вариации состава пород вулканов Южной Камчатки указывают на усложненные условия формирования магм. Это находит отражение в формировании различных типов вулканических структур, отличных от таковых Восточного вулканического пояса и Северных Курил.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.Б. Перепелову, Д.П. Савельеву и неизвестным рецензентам за ценные комментарии и замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10019-П, <https://rscf.ru/project/22-77-10019-П>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдейко Г.П., Савельев Д.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. Принцип актуализма: критерии для палеотектонических реконструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. 2003. № 1. С. 32–59.
2. Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. 2006. Т. 14. № 3. С. 248–265. <https://doi.org/10.1134/S0869591106030027>
3. Апрельков С.Е., Попруженко С.В., Богдан П.С., Касьянюк Е.Е. Структуры фундамента и локализация вулканизма Южной Камчатки // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. 2001. С. 34–44.
4. Бергаль-Кувикас О.В. Особенности пространственного проявления вулканизма Парамуширской группы, Курильская островная дуга // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. 2012. № 2. С. 194–207.
5. Бергаль-Кувикас О.В. Объемы четвертичных вулканитов Курильской островной дуги: анализ пространственного расположения и связь с зоной субдукции // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 2. С. 103–116.
6. Бергаль-Кувикас О.В., Буслов М.М., Бушенкова Н.А., Долгая А.А. Переход от континентальной окраины Камчатки к островной дуге Курильских островов: Особенности проявления вулканизма, деформации земной коры и геофизические параметры слэба // Геология и геофизика. 2023. Т. 64, № 10. С. 1469–1484 <https://doi.org/10.15372/GiG2023136>
7. Бергаль-Кувикас О.В., Гордеев Е.И., Кулаков И.Ю. Роль задугового бассейна в формировании гетерогенности слэба и происхождении вулканизма Курило-Камчатской островной дуги // Докл. АН. Науки о Земле. 2024. Т. 516, № 2. С. 600–605 <https://doi.org/10.31857/S2686739724060126>
8. Варга П., Рогожин Е.А., Шуле Б., Андреева Н.В. Оценка энергии, высвободившейся при сильнейших ($M \geq 7$) глубоководных сейсмических событиях с учетом данных о землетрясении в Охотском море 24 мая 2013 г. ($M_w = 8.3$) // Физика Земли. 2017. № 3. С. 62–87 <https://doi.org/10.7868/S0002333717030139>
9. Гордеев Е.И., Бергаль-Кувикас О.В. Строение и вулканизм зоны субдукции на Камчатке // Докл. АН. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 72–76.
10. Зеленин Е.А. Позднечетвертичные деформации Южной Камчатки // Вестн. Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2017. № 3. С. 103–111.
11. Леонов В.Л. О некоторых закономерностях развития гидротермальной и вулканической деятельности на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 28–40.
12. Леонов В.Л., Рогозин А.Н. Карымшина – гигантская кальдера-супервулкан на Камчатке: границы, строение, объем пирокластики // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 14–28.
13. Масуренков Ю. П. Долгоживущий центр эндогенной активности южной Камчатки. М.: Наука, 1980.
14. Павлов Ю.А., Юнов А.Ю. О мощности земной коры на Камчатке // Докл. АН СССР. 1970. Т. 191, № 1. С. 194–196.
15. Плечов П.Ю., Балашова А.Л., Дирксен О.В. Дегазация магмы кальдерообразующего извержения Курильского озера 7600 лет назад и ее влияние на климат // Докл. АН. 2010. Т. 433, № 3. С. 386–389.
16. Прошкина З.Н., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. Структура, вещественный состав и глубинное строение океанского склона Центральных Курил: новые детали // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 6. С. 58–69.
17. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им.Витуса Беринга, 2009. 191 с.
18. Шеймович В.С., Патока М.Г. Геологическое строение зон активного кайнозойского вулканизма. М.: ГЕОС, 2000. 208 с.
19. Andrews B.J., Dufek J., Ponomareva V. Eruption dynamics and explosive-effusive transitions during the 1400 cal BP eruption of Opala volcano, Kamchatka, Russia // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2018. V. 356. P. 316–330.

- <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.019>
20. Bergal-Kuvikas O., Bindeman I., Chugaev A., Larionova Y., Perepelov A., Khubaeva O. Pleistocene–Holocene monogenetic volcanism at the Malko-Petropavlovsk zone of transverse dislocations on Kamchatka: Geochemical features and genesis // *Pure and Applied Geophys.* 2022. V. 179. P. 3989–4011. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02956-7>
 21. Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Chen C.H. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar–Ar and U–Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2010. V. 189, N 1–2. P. 57–80. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.10.009>
 22. Bindeman I.N., Leonov V.L., Colón D.P., Rogozin A.N., Shipley N., Jicha B., Gerya T.V. Isotopic and petrologic investigation, and a thermomechanical model of genesis of large-volume rhyolites in arc environments: Karymshina Volcanic Complex, Kamchatka, Russia // *Frontiers in Earth Sci.* 2019. V. 6. P. 238. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00238>
 23. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Melekestsev I.V., Bailey J. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // *Quaternary Res.* 1997. V. 47, N 2. P. 125–139. <https://doi.org/10.1006/qres.1996.1876>
 24. Cassel E.J., Smith M.E., Jicha B.R. The impact of slab rollback on Earth's surface: Uplift and extension in the hinterland of the North American Cordillera // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45, N 20. P. 10996–11004. <https://doi.org/10.1029/2018GL079887>
 25. Churikova T., Dorendorf F., Wörner G. Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // *J. Petrol.* 2001. V. 42, N 8. P. 1567–1593. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.8.1567>
 26. Duggen S., Portnyagin M., Baker J., Ulfbeck D., Hoernle K., Garbe-Schönberg D., Grassineau N. 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, N 2. P. 452–480. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.09.018>
 27. Global Volcanism Program <https://volcano.si.edu>
 28. Gorbatov A., Kostoglodov V., Suárez G., Gordeev E. Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 1997. V. 102 (B8). P. 17883–17898. <https://doi.org/10.1029/96JB03491>
 29. Kincaid C., Olson P. An experimental study of subduction and slab migration // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 1987. V. 92 (B13). P. 13832–13840. <https://doi.org/10.1029/JB092iB13p13832>
 30. Krashenninnikov S.P., Bazanova L.I., Ponomareva V.V., Portnyagin M.V. Detailed tephrochronology and composition of major Holocene eruptions from Avachinsky, Kozelsky, and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2020. V. 408. 107088. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107088>
 31. Latyshev A.V., Anosova M.B., Latanova E.A., Bergal-Kuvikas O.V. Paleomagnetism of Miocene Magmatic Formations in South Kamchatka // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2025. V. 61, N 3. P. 318–333. <https://doi.org/10.1134/S1069351325700351>
 32. Liang Y., Guo W., Ma Y., Zhao, E. Geochemical evidence for thickening and thinning of lower crust beneath the Jiaodong Peninsula: Implications for late Mesozoic destruction of the eastern North China Craton // *Lithosphere.* 2020 V. 1. 8831664. <https://doi.org/10.2113/2020/8831664>
 33. Plank T., Langmuir C.H. An evaluation of the global variations in the major element chemistry of arc basalts // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1988. V. 90, N 4. P. 349–370. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90135-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90135-5)
 34. Seligman A., Bindeman I., Jicha B., Ellis B., Ponomareva V., Leonov V. Multi-cyclic and isotopically diverse silicic magma generation in an arc volcano: Gorely eruptive center, Kamchatka, Russia // *J. Petrol.* 2014. V. 55, N 8. P. 1561–1594. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu034>
 35. Simon A., Yogodzinski G.M., Robertson K., Smith E., Selyangin O., Kiryukhin A., Walker J. D. Evolution and genesis of volcanic rocks from Mutnovsky Volcano, Kamchatka // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2014. V. 286. P. 116–137. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.09.003>
 36. Syracuse E.M., Abers G.A. Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochem., Geophys., Geosyst. (G3).* 2006. V. 7, N 5. <https://doi.org/10.1029/2005GC001045>
 37. Tatsumi Y., Eggins S. Subduction zone magmatism. In: *Subduction Zone Magmatism* // Blackwell Sci., 1995. *Frontiers in Earth Sciences*, 211 p. ISBN: 086542361X; 978-086542361-9
 38. Volcano Global Risk Identification & Analysis Project <https://vogripa.org/>
 39. Volynets A.O., Churikova T.G., Wörner G., Gordeychik B.N., Layer P. 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. P. 659–687. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0447-9>

Рекомендована к печати А.И. Кожуриным

после доработки 11.03.2026 г.

принята к печати 13.03.2026 г.

ANALYSIS OF THE SPATIAL AND TEMPORAL FEATURES OF VOLCANISM IN SOUTHERN KAMCHATKA

S.A. Rylova^a, O.V. Bergal-Kuvikasa^{a,b}

^aInstitute of volcanology and seismology FEB RUS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

^bVitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; e-mail: kuvikas@mail.ru

Based on a comparison of different types of volcanoes, the volumes of igneous material, the geochemical characteristics of magma, and the parameters of the Earth's crust, we have conducted an analysis of volcanic activity in Southern Kamchatka. Thus, volumetric shields and complex volcanoes of the Neogene-Pleistocene age are located in the rear of the arc, at a distance of ~273–283 km from the modern deep-sea trench. The active volcanic belt is located at a distance of 200–225 km from the deep-sea trench and is characterised by the predominance of caldera and complex volcanoes. The existence of areal monogenetic volcanism is recorded in the range of ~208–268 km from the deep-sea trench, indicating active extension processes, beginning in the Early Pleistocene-Holocene time. The coexistence of acidic and basic magmatism in the modern active volcanic belt suggests the potential for recharge of acidic magmatic chambers within the caldera complexes with basic magmas in Southern Kamchatka. The geochemical zonation along the arc is poorly expressed in terms of incompatible and incoherent elements, which distinguishes Southern Kamchatka from the Eastern Volcanic Belt and the Northern Kuril Islands. Spatial and temporal characteristics reveal complicated processes of magma formation in the volcanoes of Southern Kamchatka compared to other segments of the Kuril-Kamchatka island arc.

Key words: types of volcanic structures, geochemical zonation, slab, subduction zone, Southern Kamchatka.