

УДК 551.2

ПЕРЕХОД ОТ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ КАМЧАТКИ К ОСТРОВНОЙ ДУГЕ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ: ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВУЛКАНИЗМА, ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЛЭБА

О.В. Бергаль-Кувикас¹, М.М. Буслов², Н.А. Бушенкова³, А.А. Долгая¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683000, Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, 9, Россия

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Проведен анализ проявления магматизма в зоне перехода от континентальной окраины Камчатки к Курильской островной дуге и геофизических параметров погружающейся под них океанической плиты Северо-Западной Пацифики. Наличие прибрежного вулканического комплекса миоценового возраста в основании вулканического пояса Южной Камчатки способствует интенсивным коровым процессам, которые, вероятно, привели к формированию кальдерообразующих извержений в голоцене. Для Северных Курил характерно формирование ареального вулканизма, приуроченного к разрывным нарушениям земной коры. Аномальным является отсутствие вулканизма на о. Шумшу, расположенном непосредственно вблизи Камчатки. Отсутствие вулканизма на этом острове связывается с высокоскоростной аномалией, фиксируемой по данным сейсмотомографии. На основе представленных данных выдвигается предположение о наличии океанического поднятия на слэбе, погружение которого привело к дезинтеграции зон плавления, отвечающих за формирование вулканизма.

Континентальная окраина, островная дуга, слэб, вулканизм, Камчатка, о. Шумшу, Курильские острова

TRANSITION FROM THE CONTINENTAL MARGIN OF KAMCHATKA TO THE ISLAND ARC OF THE KURILE ISLANDS: FEATURES OF VOLCANISM, CRUSTAL DEFORMATION AND GEOPHYSICAL PARAMETERS OF THE SLAB

O.V. Bergal-Kuvikas, M.M. Buslov, N.A. Bushenkova, A.A. Dolgaya

Magmatism manifestations in the transition zone from the continental margin of Kamchatka to the Kurile island arc and some geophysical parameters of the subducted oceanic plate of the Northwestern Pacific are considered. The presence of the Miocene coastal volcanic (Pribrezhny) complex at the base of the South Kamchatka volcanic belt contributes to intense crustal processes causing caldera-forming eruptions in the Holocene. The Northern Kuriles are characterized by initiation of areal volcanism associated with crustal fault zones. Anomalous is the absence of volcanism on Shumshu island proximal to Kamchatka. Seismic tomography data reveal a high seismic velocity anomaly below it, which can explain this phenomenon. Based on the presented data an assumption is made about existence of a seafloor elevation on the slab, whose submergence led to disintegration of the melting regions responsible for generation of volcanism.

Continental margin, island arc, slab, volcanism, Kamchatka, Shumshu island, Kurile islands

ВВЕДЕНИЕ

Проблема формирования земной коры на активных окраинах тектонических плит является фундаментальной в науках о Земле. Благодаря процессам в зонах субдукции происходит прирост континентов, образуются островные дуги и открываются задуговые бассейны. По возрасту погружающейся плиты и доминирующим силам напряжений зоны субдукции классифицируются на: 1) чилийский тип с молодой, тонкой океанической литосферой и с преобладанием сил сжатия и 2) марианский тип, характеризующийся древней, холодной, плотной океанической литосферой с доминированием сил растяжения и открытием задугового бассейна [Stern, 2002]. В русскоязычной литературе [Хаин, Ломизе, 2005] выделяют активные континентальные окраины (андский тип), что соответствует чилийскому типу субдукции, и островные дуги, что совпадает с марианским типом субдукции в англоязычной литературе. На основе геохимических характеристик и определений возраста горных пород зафиксированы смены

© Бергаль-Кувикас О.В.✉, Буслов М.М., Бушенкова Н.А., Долгая А.А.

✉e-mail: kuvkas@mail.ru

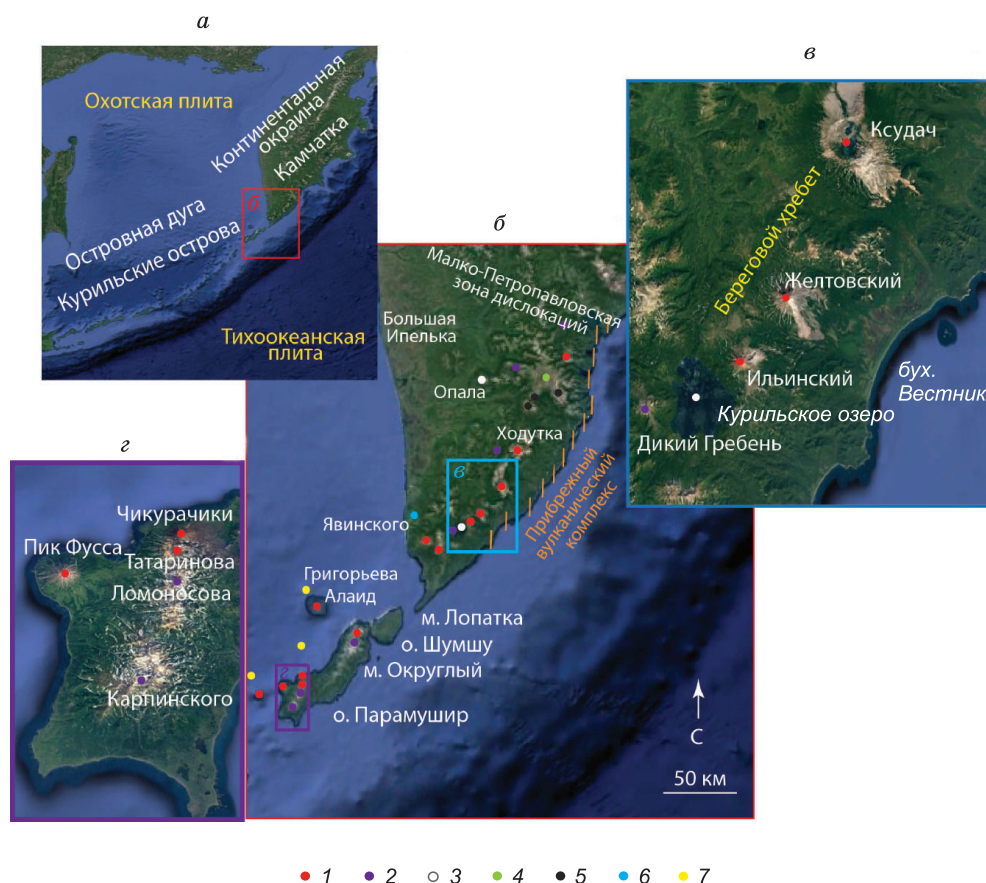


Рис. 1. Курило-Камчатская островная дуга (а), зона перехода (б), континентальная окраина Камчатки с кальдерообразующими извержениями (в), о. Парамушир с ареальным проявлением вулканизма (г).

Классификация вулканов согласно [Информационная система..., 2022]. Граница прибрежного вулканического комплекса, по данным [Государственная..., 2000, 2006], показана оранжевыми штрихами. Типы вулканов: 1 — стратовулканы, 2 — шлаковые конусы, экструзивные купола, 3 — кальдеры, 4 — вулканические хребты, 5 — комплексы, 6 — щитовые вулканы, 7 — подводные вулканы.

обстановок от островных дуг к континентальным окраинам и, наоборот, в палеокомплексах Египта [Abdel-Karim, 2013], Китая [Li et al., 2012; Cui et al., 2017] и в современных обстановках Новой Зеландии [Gamble et al., 1993]. Геофизические исследования строения земной коры вдоль Аляски и Алеутских островов показали, что в основании Аляски, возможно, находится аккреционный блок с характеристиками океанической коры, вошедший в состав континентальной окраины [Fliedner, Klemperer, 2000]. Активное влияние контаминации в эволюции магматических комплексов было зафиксировано в зоне перехода Кермадек—Хикуранги от островной дуги Кермадек к активной континентальной окраине Новой Зеландии в Юго-Западной Пацифике [Macpherson et al., 1998]. Трансформация островодужного вулканизма в типичный для активной континентальной окраины в Центральной Америке объясняется погружением в зону субдукции слэба, испытавшего воздействие Галапагосского плюма [Gazel et al., 2019].

В последнее время достигнуты существенные успехи в изучении процессов формирования зон субдукции и происхождения вулканизма в пределах одной дуги с одинаковыми геофизическими параметрами погружающейся плиты. Подобный пример — это Курило-Камчатская зона субдукции, где фиксируется переход от континентальной окраины Южной Камчатки к Курильской островной дуге. Для Южной Камчатки типично проявление различных типов вулканизма с неоднократным проявлением мощных кальдерообразующих извержений, тогда как на ближайшем о. Парамушир широко представлены стратовулканы и шлаковые конусы, приуроченные к разрывным нарушениям, а кальдеры, аналогичные Южной Камчатке, отсутствуют (рис. 1). Аномальным является отсутствие вулканизма на о. Шумшу, расположенном непосредственно вблизи Камчатки. Таким образом, цель настоящей работы — на основе комплексного анализа результатов геофизических исследований, распределения молодого (плей-

стоцен-голоценового) вулканизма, деформаций земной коры и изотопно-геохимических характеристик генерируемых магм описать особенности формирования зоны перехода континентальной окраины к островной дуге и выявить причину отсутствия вулканизма на о. Шумшу. В данной публикации мы целенаправленно ограничиваем наше исследование Северными Курилами, включающими о. Парамушир, о. Атласова, о. Анциферова и ряд близлежащих подводных вулканов, поскольку в Южном и Центральном сегментах Курильской островной дуги есть влияние задугового бассейна и процессов, связанных со становлением и эволюцией мантийных источников [Мартынов и др., 2005, 2010; Bourova et al., 2010; Martynov et al., 2010; Martynov, 2013].

МЕТОДЫ

Представленная работа основана на междисциплинарном подходе, предполагающем изучение особенностей проявления магматизма, параметров слэба и деформаций земной поверхности.

Метод радарной интерферометрии (InSAR). Для оценки деформаций земной поверхности в исследуемом районе применялся метод InSAR, который относится к методам радиоволнового сканирования. Благодаря низкой атмосферной абсорбции по отношению к радиоволнам наблюдения с помощью радара с синтезированной апертурой (Synthetic-aperture radar, SAR) могут проводиться даже при высокой облачности [Curlander, McDonough, 1992]. Спутники Sentinel-1 собирают данные SAR по всему земному шару с возможностью делать повторяющиеся снимки раз в 6 дней [Sentinel-1..., 2022]. Фазовый компонент SAR-изображений позволяет определять малые изменения высоты на поверхности Земли между двумя измерениями. Вычислив разницу между фазовыми изображениями, полученными из одного и того же места в пространстве в два разных момента времени, можно получить интерферограмму, отображающую смещение отражающих сигнал объектов в направлении на спутник. Этот подход называется SAR-интерферометрия или InSAR. Метод дифференциальной SAR-интерферометрии (DInSAR) предполагает пересчет разницы значений фаз двух интерферограмм в величину смещения земной поверхности. Разница между изображениями интерпретируется как вертикальные деформации (поднятия и опускания), накопившиеся за время между двумя сборами данных [Hanssen, 2001]. Для построения карт деформаций земной поверхности в исследуемом районе использовался сервис Vertex, разработанный Alaska Satellite Facility (ASF), подразделением Геофизического института Университета Аляски в Фейрбенксе [Kristenson, 2022]. ASF ведет архив NASA с данными радаров с синтезированной апертурой, получаемыми от различных источников (спутников и других летательных аппаратов), а также предоставляет эти данные и сервисы исследователям для работы с ними.

Для того чтобы устранить влияние неоднородности атмосферы и других факторов, зашумляющих карты распределения деформаций, полученные интерферограммы были обработаны методом малых базовых линий (SBAS — Small BAseline Subset). Суть метода заключается в том, что пары SAR-снимков, участвующие в генерации интерферограмм, выбираются таким образом, чтобы минимизировать пространственное и временное разделение (базовую линию) между орбитами сбора данных, тем самым смягчая явления декорреляции [Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2007]. Метод SBAS позволяет получить карты средней скорости деформации и временные серии карт деформаций для каждого участка исследуемой территории.

Анализ цифровой модели рельефа. Для изучения особенностей строения исследуемого участка зоны субдукции проводился анализ профилей рельефа. В качестве батиметрической основы для построения аквальной части комбинированных профилей рельефа использована цифровая модель океанического дна, созданная проектом GEBCO [The General..., 2022]. В качестве гипсометрической основы для построения аэральской части комбинированных профилей рельефа применяли цифровую модель проекта Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), снимки с разрешением 1 с (30 м). Профили рельефа строились в среде ArcGIS с помощью инструмента «График профиля» панели инструментов 3D Analyst.

Сейсмическая томография. Исследуемый участок зоны субдукции находится на краю области покрытия сейсмологических данными и за пределами области изучения в работах по моделированию сейсмотомографической структуры надсубдукционного клина района Центральной Камчатки [Бушенкова и др., 2022; Bushenkova et al., 2023] и поэтому не вошел в ранее представленные томографические модели. В этих работах использованы времена вступления *P*- и *S*-волн от событий (землетрясений), зарегистрированных постоянными станциями Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) и 33 временными станциями сети в Центральной Камчатке за период работы этой временной сети (2019—2020 гг.). Всего было отобрано 59 088 времен пробега *P*-волн и 34 697 времен пробега *S*-волн от 2687 сейсмических событий. С дополнением данными временной сети на Авачинской группе вулканов (зарегистрированными 18 станциями в рамках полевого эксперимента 2018—2019 гг.) общее количество времен пробега *P*- и *S*-волн за период с августа 2018 по июль 2020 года составило почти 98 000 от 2963 локальных землетрясений. Релока-

ция источников, подбор параметров инверсии и расчет модели выполнены в соответствии с методикой и программным кодом локальной сейсмотомографии LOTOS [Koulakov, 2009]. Алгоритм находится в открытом доступе и активно используется многими исследователями во всем мире, в том числе при изучении вулканов Камчатки [Bushenkova et al., 2019; Кулаков, 2022; и др.]. Алгоритм основан на применении времен пробега продольных и поперечных волн от местных землетрясений, зарегистрированных станциями в исследуемом регионе. Этот алгоритм позволяет изучать структуру земных недр в масштабах от нескольких километров до первых сотен километров, причем глубинность исследований обычно ограничивается распределением землетрясений и размером области. Проведенный комплекс синтетических и реалистичных тестов показал, что полученная по новым данным 2018—2020 гг. томографическая модель позволяет уверенно выделять на краях области покрытия данными структуры с характерным размером от 50 км на глубинах вплоть до 100 км. Параметры погружающейся плиты, такие как возраст погружающейся плиты, скорость движения и термальный параметр, были заимствованы из публикации [Syracuse, Abers, 2006].

Данные о вулканизме района исследований. Для изучения особенностей распространения вулканизма была использована классификация вулканических форм, опубликованная на сайте Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН [Информационная система..., 2022]. Наиболее полная информация о расположении подводных вулканов с их координатами приводится в работе [Авдейко и др., 1992]. Расстояния от оси желоба до вершин подводных вулканов были опубликованы ранее [Бергаль-Кувикас, 2015].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Глубинная структура. Современная Курило-Камчатская зона субдукции состоит из трех сегментов — Восточно-Камчатского, Южно-Камчатского и Курильского — с разной историей тектонического развития и разными геодинамическими режимами [Авдейко и др., 2001]. Южно-Камчатский сегмент с севера ограничен Малко-Петропавловской зоной поперечных дислокаций, выраженной в аномалии геофизическим параметрам слэба [Гордеев, Бергаль-Кувикас, 2022] и в проявлении моногенного вулканизма [Bergal-Kuvikas et al., 2022], приуроченного к повышенной трещиноватости земной коры [Агибалов и др., 2023]. По результатам сейсмотомографии на поверхности слэба фиксируется Авачинский разлом [Бушенкова и др., 2022], который является южной границей аккреции Кроноцкой палеодуги в Восточно-Камчатском сегменте [Авдейко, Бергаль-Кувикас, 2015]. Существование зоны глубокофокусных землетрясений в районах Курильских островов и Южной Камчатки, а также особенности сейсмической структуры литосферы и мантии показывают, что юг Камчатки, как и Северные Курилы, находится под влиянием схожих тектонических процессов [Мороз, Гонтовая, 2018]. По наблюдениям [Syracuse, Abers, 2006] с севера на юг изучаемого района происходит удревнение слэба от 92 до 106 млн лет, увеличиваются скорость движения плиты, с 77 до 79 км/млн лет, и термальный параметр, с 56 до 65 км (рис. 2).

По данным сейсмотомографии, в частности, по локализации землетрясений и распределению аномалий скоростей объемных волн вкрест простираения зоны суб-

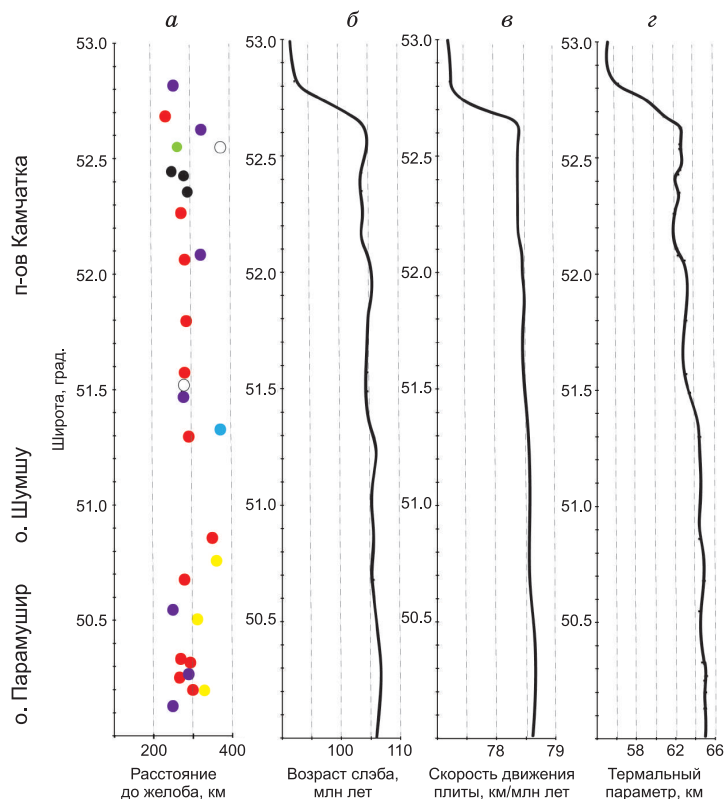


Рис. 2. Типы вулканов в зависимости от расстояния до желоба (а); вариации параметров слэба и вулканизма (б—г) вдоль Южной Камчатки и Северных Курил.

а — кругами разного цвета обозначены разные типы вулканов [Информационная система..., 2022]. Усл. обозн. см. на рис. 1. Параметры погружающейся плиты соответствуют [Syracuse, Abers, 2006]. Термальный параметр определялся как произведение возраста, скорости и угла погружения слэба, деленное на 100 [Syracuse, Abers, 2006].

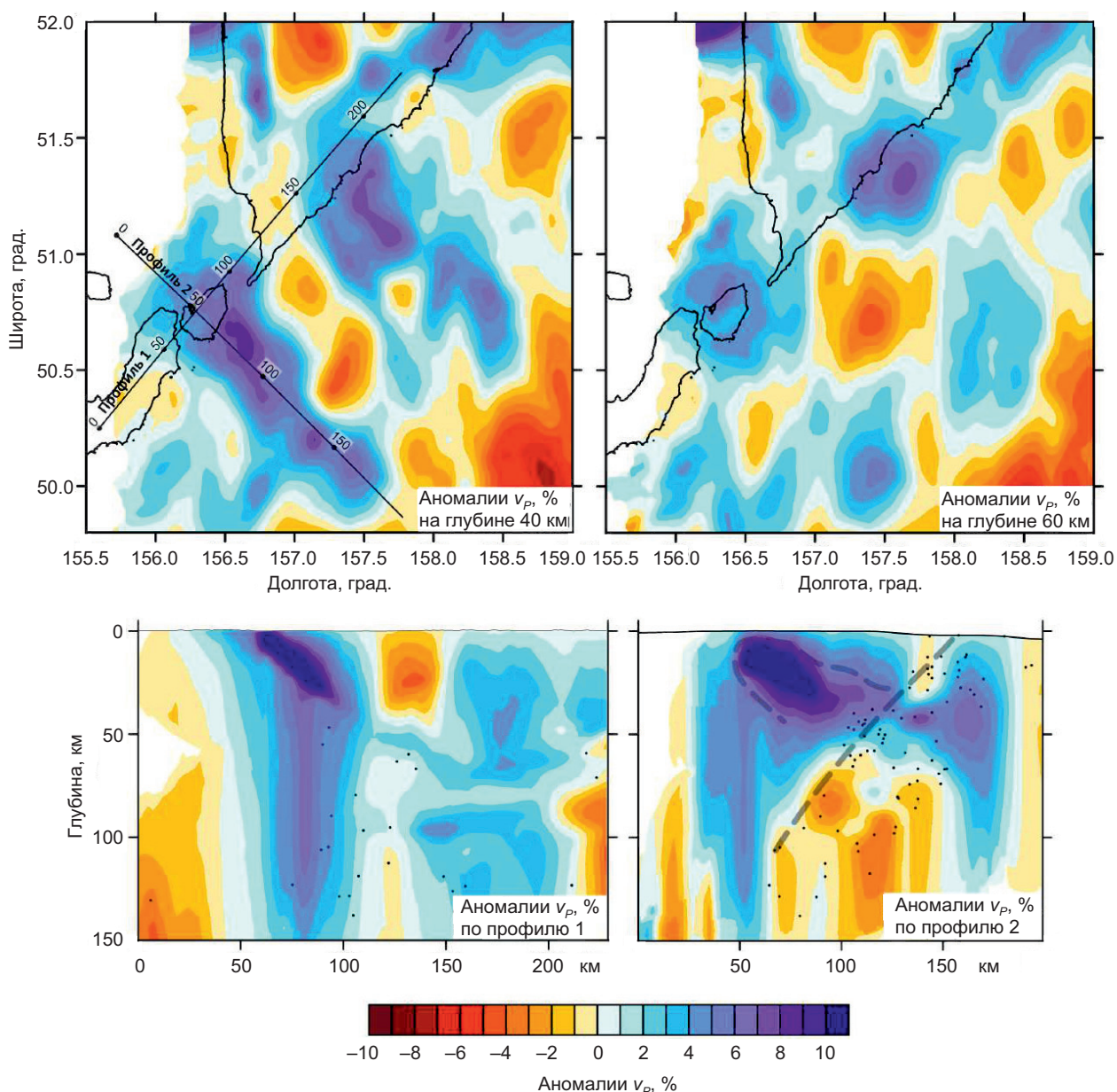


Рис. 3. Распределения аномалий скорости P -волн на горизонтальных и вертикальных сечениях анализируемой сейсмотомографической модели.

Здесь и на рис. 4: черными точками на вертикальных сечениях отмечены землетрясения вдоль соответствующего сечения, данные по которым использованы в работе. Штриховыми линиями показаны поверхность слэба и высокоскоростная аномалия под о. Шумшу.

дукции на профиле 2 (рис. 3, 4) фиксируются слэб и мантийный клин. Кроме того, на профилях (см. рис. 3, 4) выявляется высокоскоростная аномалия в земной коре и верхней мантии на глубинах до 40 км. Эта аномалия обладает значительными размерами и, по-видимому, связана со структурой слэба, мантийного клина и нижней коры в районе о. Шумшу. На вертикальных сечениях сейсмотомографической структуры видно, что мощность аномалии составляет до 20—15 км, а протяженность до 60 км. Подобный феномен не объясним с точки зрения теории «горячих пальцев» [Tamura et al., 2002] или чередования и неравномерности подъема вещества к земной поверхности [Добрецов и др., 2009]. Мы полагаем, что аномалия представляет собой фрагмент океанической литосферы, вероятно, сложенный породами вулканического поднятия (палеосимаунта).

Для подтверждения реальных возможностей примененного сейсмотомографического подхода в выявлении пространственного распределения и геометрии скоростных аномалий на основе имеющегося

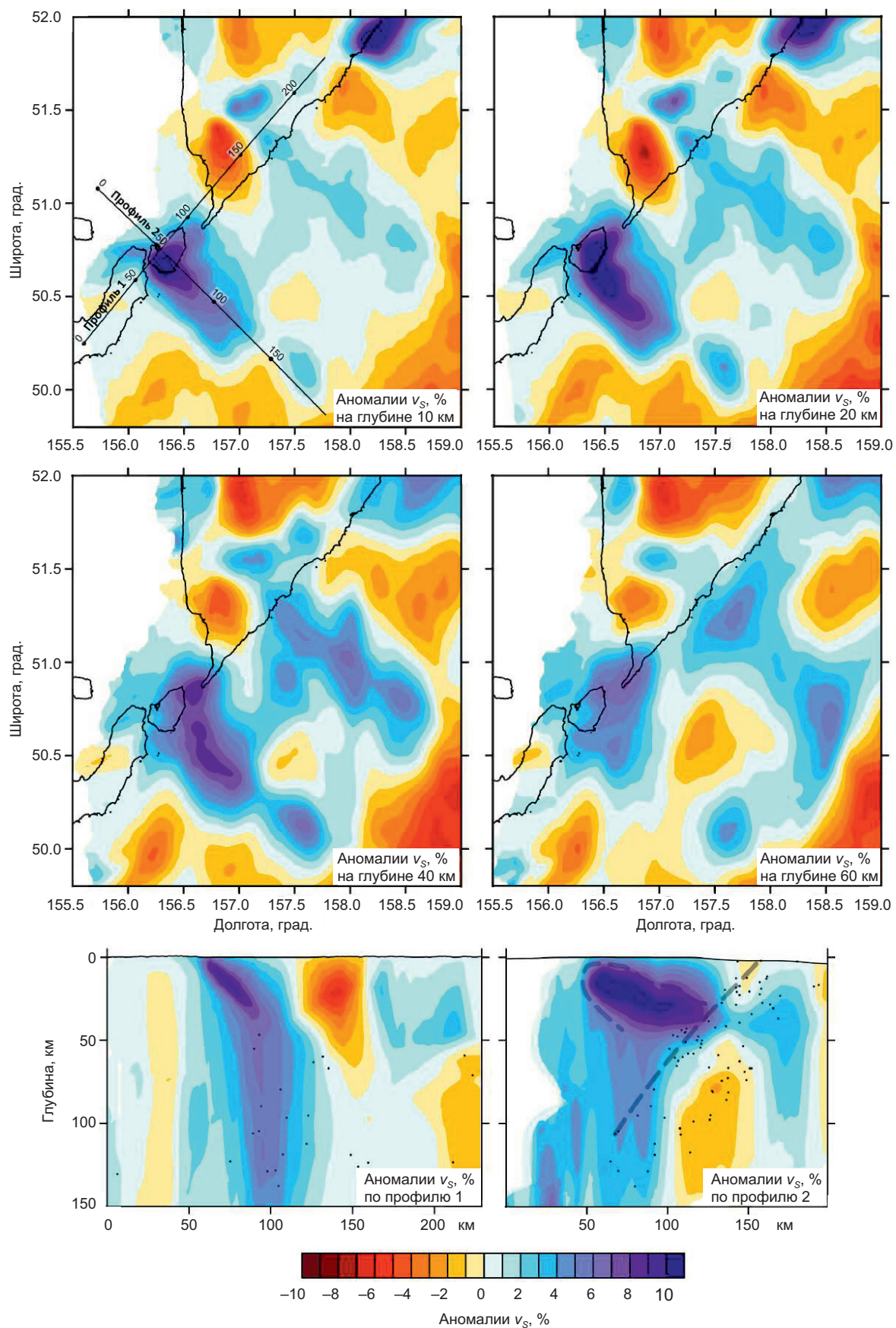


Рис. 4. Распределения аномалий скорости S -волн на горизонтальных и вертикальных сечениях анализируемой сейсмотомографической модели.

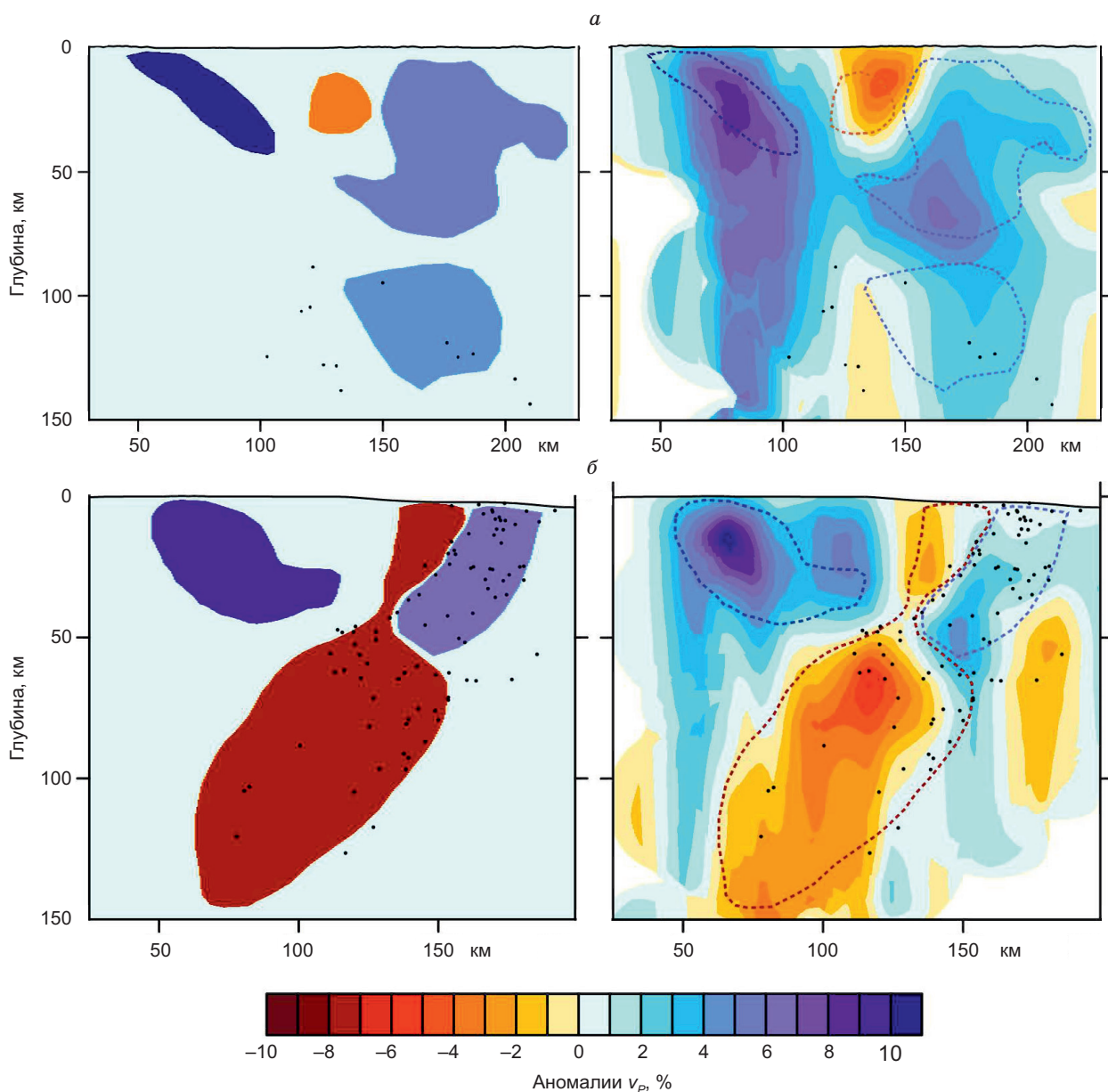


Рис. 5. Примеры тестов с синтетическими аномалиями v_p разной формы и интенсивности:

а — тест вдоль профиля 1, *б* — вдоль профиля 2 (пространственное расположение профилей идентично рис. 3 и 4); на схемах слева приведены задаваемые синтетические структуры, справа — результат их восстановления на основе используемых в работе плотности и распределения событий и сейсмических станций.

набора сейсмологических данных для исследуемого в настоящей работе района мы выполнили дополнительную серию тестов с синтетическими аномалиями разной интенсивности, формы и взаимного расположения. На рисунке 5 представлены примеры некоторых из этих тестов вдоль профилей 1 и 2, которые демонстрируют хорошее восстановление заданных структур синтетических аномалий при имеющейся системе наблюдений (особенно вдоль профиля 2), как минимум до глубин ~70 км, и удовлетворительное до глубины 100 км.

Морфология шельфа, аккреционного клина, желоба и морфология погружающейся плиты вблизи глубоководного желоба связаны со сжатием или растяжением в зоне субдукции [Селиверстов, 2013]. Анализ морфологии склона Курило-Камчатского желоба в области Южной Камчатки показал сложный рельеф поверхности склона, который предположительно соответствует выходу пород аккреционного клина (рис. 6, б, в), в то время как поверхность склона в районе Северных Курил не усложнена (рис. 6, г, д). Обращает на себя внимание наличие подводных гор на Тихоокеанской плите в области,

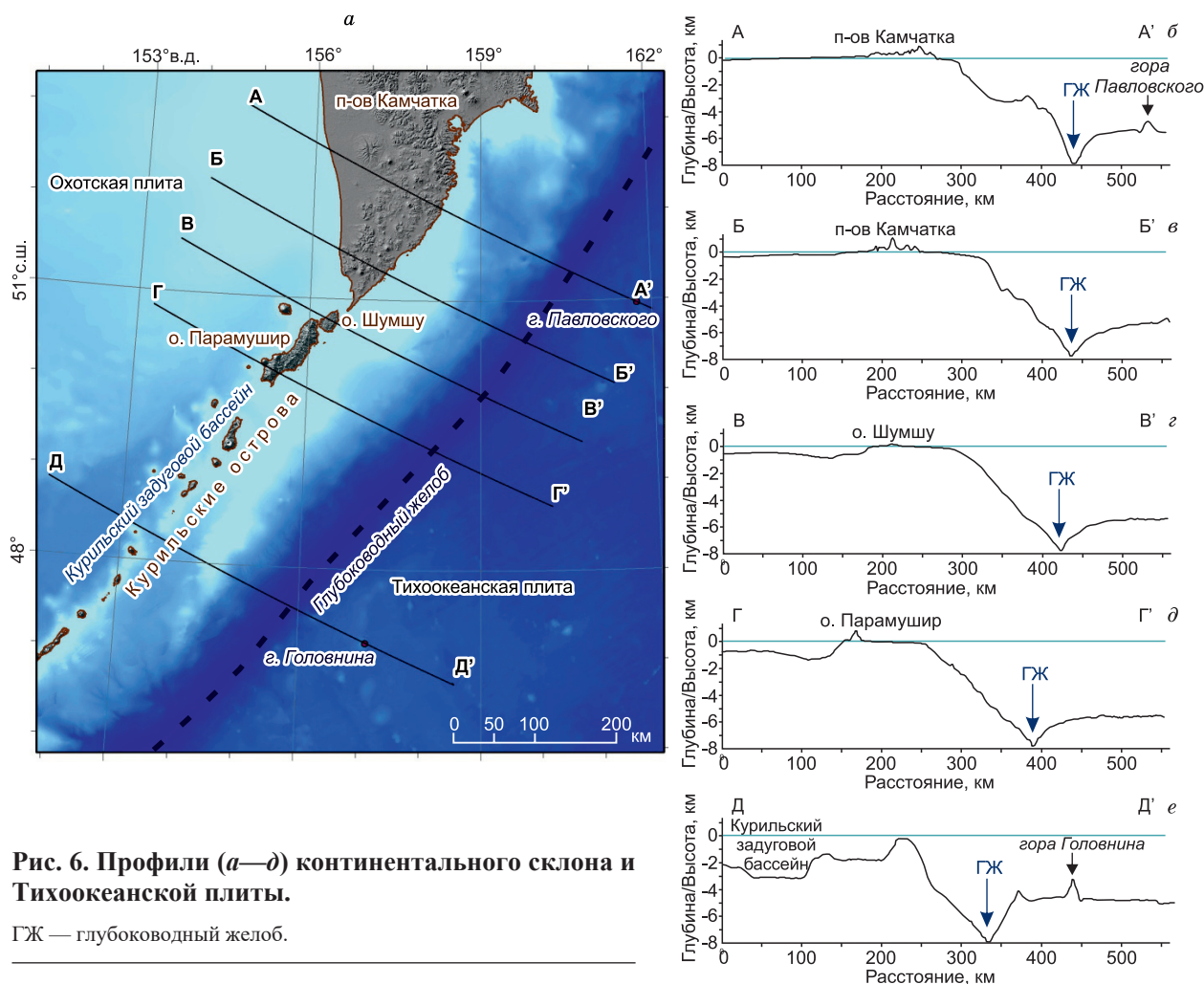


Рис. 6. Профили (а—д) континентального склона и Тихоокеанской плиты.

ГЖ — глубоководный желоб.

непосредственно прилегающей к глубоководному желобу. Часть возвышенностей фиксируется по данным эхолотного зондирования у побережья Южной Камчатки, например, гора Павловского (–4155 м), и у Центральных Курил, гора Головнина (–3725 м), при фоновых значениях изобат –6000—5500 м [Международный..., 2003] (рис. 5).

Деформации земной поверхности. Для оценки деформаций земной коры с помощью сервиса Vertex по методике SBAS было проанализировано 12 пар снимков исследуемого района, полученных с помощью спутника Sentinel-1 в летние месяцы в период с 2016 по 2022 г. Для анализа подбирались пары снимков с минимальным пространственным разнесением (менее 20 м) и временным интервалом в 1 год. Все снимки, участвовавшие в анализе, были сделаны на нисходящей орбите спутника. Было проанализировано по две интерферограммы для каждого годового интервала (2016—2017, 2017—2018 и т. д.). Итоговая карта смещений в направлении на спутник (рис. 7) представляет собой усреднение всех полученных интерферограмм. Положительные смещения в направлении на спутник интерпретируются как поднятия земной поверхности, а отрицательные смещения — как опускания, однако абсолютные значения амплитуд смещения нельзя воспринимать как реально зафиксированные поднятия или опускания поверхности Земли с указанной амплитудой. В связи с этим на рис. 7 приведена качественная схема распределения деформаций. В целом северная часть о. Парамушир испытывает опускание, но в прибрежной части хр. Вернадского отчетливо регистрируется область воздымания. На о. Атласова фиксируется поднятие вокруг вершины влк. Алаид. На о. Шумшу также выявляются положительные деформации. Необходимо заметить, что для проведения исследований были использованы снимки, сделанные исключительно в летний бесснежный период, поэтому выявленные деформации нельзя объяснить изменением толщины снежного покрова. Фиксируемые поднятия в зонах активного вулканизма на о. Парамушир и на о. Атласова свидетельствуют о процессах, связанных с вулканической активностью, в то время как опускание береговой линии севера о. Парамушир и подъем о. Шумшу, возможно, отражают геодинамическую обстановку взаимодействия слэба, мантийного клина и земной коры.

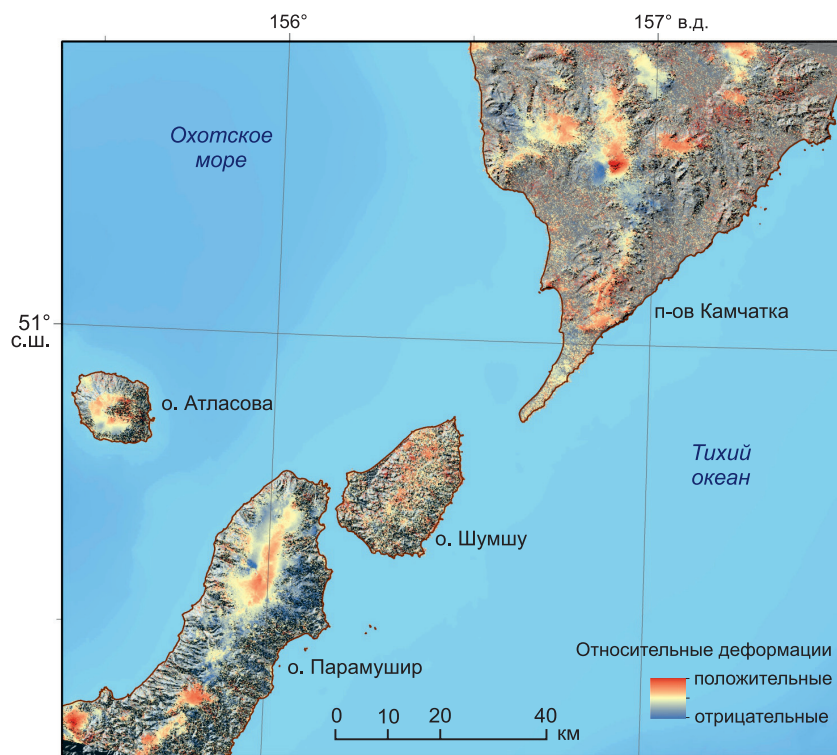


Рис. 7. Относительные деформации земной поверхности, полученные методом SBAS по InSAR-данным.

Положительные деформации интерпретируются как поднятия, отрицательные — как опускания.

Вулканизм. В пределах Южно-Камчатского сегмента примерно 25 млн л. н. сформировался практически стационарный режим субдукции [Авдейко и др., 2003]. Здесь развиты разновозрастные магматические комплексы и разные типы вулканизма [Долгоживущий центр..., 1980]. Для характеристики современных процессов, связанных с субдукцией, мы рассматриваем вулканические структуры голоценового возраста. Анализ проявления вулканизма свидетельствует, что в голоцене в рассматриваемом регионе были проявлены разнообразные типы вулканической активности. Для вулканического фронта характерно развитие стратовулканов (см. рис. 2, а). Важно отметить, что с конца плейстоцена на Южной Камчатке происходили мощные кальдерообразующие извержения — это выделяет данный сегмент дуги по сравнению с другими вулканическими поясами Камчатки [Гордеев, Бергаль-Кувикас, 2022]. Извержения вулканов Ксудач, Курильского озера, Опалы, Ходуткинского маара неоднократно проявляли активность в позднем плейстоцен—голоцене, их тefры распространялись на огромные территории, формируя надежные маркирующие горизонты [Braitseva et al., 1997; Мелекесцев, 2016]. Значительные объемы кислой пирокластики отдельных вулканических центров (например, кальдеры Карымшина, Паужетка, Ксудач) связаны с развитием крупных очагов кислых магм, формирование которых обусловлено процессами ассимиляции и контаминации [Volynets et al., 1999; Bindeman et al., 2019; Davydova et al., 2022]. Процессы ассимиляции, предполагающие взаимодействие мантийных расплавов с вмещающими толщами и иные способы вовлечения коровых субстратов, действуют наряду с фракционной кристаллизацией [Reiners et al., 1985; Sparks, 1986]. Объемы эксплозивных извержений для кальдеры Паужетка оцениваются в 300—450 км³, Карымшина — 800 км³, Горелого — 120 км³ [Bindeman et al., 2010]. Напротив, Северные Курилы, в частности о. Парамушир, характеризуются проявлением ареального вулканизма, приуроченного к разрывным зонам северо-восточного простирания [Хубаева и др., 2020]. Часть вулканических аппаратов о. Парамушир по классификации все же относится к стратовулканам (см. рис. 1, 2). Характер вариаций составов базальт-андезитовых магм Северных Курил отражает геохимическую зональность магматизма вкрест простирания дуги и зависит от параметров слэба [Бергаль-Кувикас, 2012]. Следов мощных эксплозивных извержений на о. Парамушир не наблюдается [Nasegawa et al., 2011]. Объемы вулканических построек ареального вулканизма на о. Парамушир варьируют от 3.0—4.5 до 140—285 км³ для отдельно стоящих вулканов, формирующих острова в тылу дуги, например о. Атласова — влк. Алаид и о. Ширинки — влк. Анциферова [Бергаль-Кувикас, 2015]. Вдоль дуги

фиксируется примерно равномерное распространение вулканов, хотя на о. Шумшу отсутствует вулканизм (см. рис. 2, а). Также некоторые вулканы расположены в глубоком тылу дуги (расстояние до желоба > 300 км), например, влк. Опала, район Толмачева озера с проявлением ареального вулканизма, влк. Явинского на юге п-ова Камчатка и влк. Алаид с подводным влк. Григорьева на Северных Курилах (см. рис. 2, а). К западу от о. Парамушир по данным геофизических наблюдений фиксируются погрешенные экструзивные купола или небольшие вулканические конусы, но в данном контексте они не рассматриваются, так как они полностью погребены под значительной толщей осадков и к активному вулканизму их отнести невозможно [Авдейко и др., 1984; Бондаренко, Рашидов, 2006].

ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение вулканов вдоль севера Курильской дуги свидетельствует об отсутствии активного вулканизма на о. Шумшу (см. рис. 1, б; 2, а). Под ним по результатам сейсмотомографии выявлена высокоскоростная аномалия (см. рис. 3, 4) и гравитационная аномалия на континентальном склоне по данным спутниковых измерений гравитационного поля [Добрецов и др., 2021]. Также наблюдаются особенности в поведении компонент поля сейсмотектонических деформаций (СТД), рассчитанных по механизмам землетрясений в слэбе [Бушенкова, Кучай, 2022]. Так, в поле широтной компоненты СТД по данным механизмов очагов землетрясений с $M > 4.8$ за период 1976—2019 гг. в диапазоне глубин 70—105 км в районе о. Шумшу вкост зоны субдукции наблюдается полоса деформаций удлинения в окружении областей укорочения, а в диапазоне глубин 35—70 км, кроме очевидного уменьшения общего количества событий с $M > 4.8$, в этой же области похожая картина выявлена в поле меридиональной компоненты СТД. Мощность высокоскоростной аномалии составляет до 20—15 км, а протяженность до 60 км. Она расположена близко к поверхности в зоне аккреционного клина и погружается под углом 45° до глубины в 40 км от о. Шумшу Курильской гряды к поверхности слэба. Мощность океанической коры (офиолитов) не превышает 7—6 км и лишь в случае проявления плюмового магматизма горячей точки может достигать 20—15 км (например, о. Исландия) [Добрецов и др., 2001]. Возможной причиной проявления аномалии может являться океаническое поднятие. Подобные поднятия (океанические острова и плато) широко представлены на океанической литосфере, например, Гавайско-Императорская система островов, погружающаяся под Северную Камчатку [Portnyagin et al., 2008], океанические острова, погружающиеся под о. Ява [Masson et al., 1990], архипелаг Новые Гибриды [Collot, Fisher, 1989], в древних складчатых областях, например, на Горном Алтае [Буслов, Ватанабе, 1996; Buslov et al., 2002; Добрецов и др., 2004; Ota et al., 2007; Буслов и др., 2013; Буслов, 2014], в Восточном Казахстане [Buslov et al., 2002; Добрецов и др., 2004; Сафонова и др., 2004], Японии [Isozaki et al., 1990], Южном Тянь-Шане [Wan et al., 2021]. В древних складчатых областях фрагменты океанических поднятий расположены среди турбидитов глубоководного желоба и, как правило, рядом с крупными офиолитовыми массивами и высокобарическими породами (эклогитами и голубыми сланцами), блоки которых приурочены к серпентинитовым меланжам. Океанические поднятия диагностируются по структурному положению в аккреционных зонах, литологическим признакам с проявлением карбонатных «шапок», вулканогенно-осадочных пород склоновых фаций и вулканических построек, а также по геохимическим характеристикам вулканитов базальтов океанических островов. Погружение подводных возвышенностей приводит к аномальным процессам в зоне субдукции, таким как возвратные течения с выводом высокобарических пород, и, как следствие, дезинтеграция зон плавления, отвечающих за формирование вулканизма [Добрецов и др., 2001]. Дезинтеграция зоны плавления и аномальный вулканизм наблюдаются, например, в районе Южной Камчатки (влк. Явинского) и на севере Курил (подводный влк. Григорьева, влк. Алаид). Эти вулканические постройки находятся в глубоком тылу дуги, что отличает их от многих вулканов Южной Камчатки и Северных Курил (рис. 1, б; 2, а). Кроме того, подводный влк. Григорьева и влк. Алаид — массивы по сравнению со многими иными вулканами Северных Курил, объемы их вулканических аппаратов составляют 40 и 285 км³ соответственно [Бергаль-Кувикас, 2015]. Изотопно-геохимические характеристики лав влк. Алаид в сравнении с вулканами о. Парамушир свидетельствуют о гетерогенности мантийного источника и плавлении осадков субдуцирующей плиты [Bergal-Kuvikas et al., 2015].

Разная динамика деформаций по данным изучения радарной интерферометрии вдоль Тихоокеанского побережья о. Парамушир, о. Шумшу и м. Лопатка на юге Камчатки также свидетельствует о локальной аномалии в строении земной коры и мантийного клина в районе перехода от континентальной окраины к островной дуге (см. рис. 7). Моделирование затягивания подводных гор и гайотов в зону субдукции подтверждает подъем земной коры, под которую происходит подвиг слэба [Domínguez et al., 1998]. При этом размер подводных возвышенностей не должен превышать нескольких километров, так как в случае погружения подводного поднятия общей мощностью литосферы ~ 17 км и более возможна блокировка зоны субдукции [Cloos, 1993]. Таким образом, можно предположить, что размер выявленной по данным сейсмотомографии высокоскоростной аномалии под о. Шумшу близок разме-

рам многочисленных возвышенностей с учетом мощности литосферы, локализованных вблизи Южной Камчатки, например, горы Павловского (–4155 м), и у Центральных Курил, гора Головнина (–3725 м), при фоновых значениях изобат –6000...–5500 м [Международный..., 2003] (см. рис. 6). Увеличение мощности слэба фиксируется в зоне сочленения Курильской островной дуги и Северо-Восточной островной дуги Хонсю на Хоккайдо. Высокоскоростная аномалия, аналогичная наблюдаемой под о. Шумшу, в исследовании [Koulakov et al., 2015] была объяснена процессами деляминации, обусловленными утолщением земной коры в области столкновения дуг. Однако между Камчаткой и Северными Курилами как таковая коллизия дуг отсутствует, соответственно, несмотря на геометрическую схожесть сейсмоотографических структур, деляминация как причина возникновения аномалии под Шумшу выглядит сомнительной.

Увеличение возраста и скорости движения Тихоокеанской плиты с севера на юг определяет повышенный термальный параметр (см. рис. 1, 2), что, возможно, приводит к дополнительному разогреву, достаточному для плавления слэба в зонах субдукции [Авдейко и др., 2011]. Ранее на основе интерпретации геофизических наблюдений и математического моделирования было показано, что под Южной Камчаткой существует термальная аномалия [Manea et al., 2004]. Обогащенные Nb базальты влк. Алаид и подводного влк. Григорьева могут быть следствием вовлечения в процесс плавления пород слэба [Bergal-Kuvikas, 2015]. Полученные данные согласуются с выводами исследования изотопно-геохимических характеристик вулканитов о том, что аномальный вулканизм на о. Парамушир является следствием температурной аномалии, связанной с вовлечением в магмогенезис продуктов плавления осадков слэба [Мартынов и др., 2009]. Таким образом, нахождение подводного влк. Григорьева и влк. Алаид в глубоком тылу дуги и нетипично субдукционные метки происхождения магм указывают на усложненные условия генезиса.

Мощность коры вдоль Южной Камчатки и Северных Курил значительно варьирует. Согласно результатам интерпретации гравитационных и магнитных аномалий, на Северных Курилах мощность коры составляет 20–24 км [Прошкина и др., 2017]. Глубина границы Мохоровичича изменяется от 30 до 45 км при траверсе от бухты Ходутка до влк. Большая Ипелька по данным глубинных исследований методом обменных волн от землетрясений Южной Камчатки [Нурмухамедов и др., 2016]. Увеличенная мощность коры Южной Камчатки и ее континентальный тип, возможно, определяют изотопно-геохимические характеристики генерируемых магм. Так, голоценовая вулканическая активность Южной Камчатки в большей степени представлена мощными кальдерообразующими извержениями, сформировавшими пикрокластику кислого состава [Braitseva et al., 1997; Гордеев, Бергаль-Кувикас, 2022].

Отличительной чертой строения континентальной коры является наличие гранитного слоя и общая мощность более 30 км [Хаин, Ломизе, 2005]. По результатам геологических работ граниты Южной Камчатки входят в состав прибрежного вулканического комплекса [Государственная..., 2006]. Ранее в исследовании береговых обрывов Тихоокеанского побережья Южной Камчатки В.С. Шеймович и М.Г. Патока [1989] объединяли вулканические и интрузивные образования различного состава (от гранитов до габбро и от базальтов до риолитов) в миоценовую андезитовую формацию, поскольку доминировали породы с андезитовым составом. При этом авторы придерживались терминологии Е.К. Устиева [1971] для классификации магматических комплексов в формацию [Шеймович, Патока, 1989]. Позже стали выделять завойковский, ахотенский и асачинские магматические комплексы, которые включили в себя покровные вулканические и интрузивные субвулканические образования, развитые в

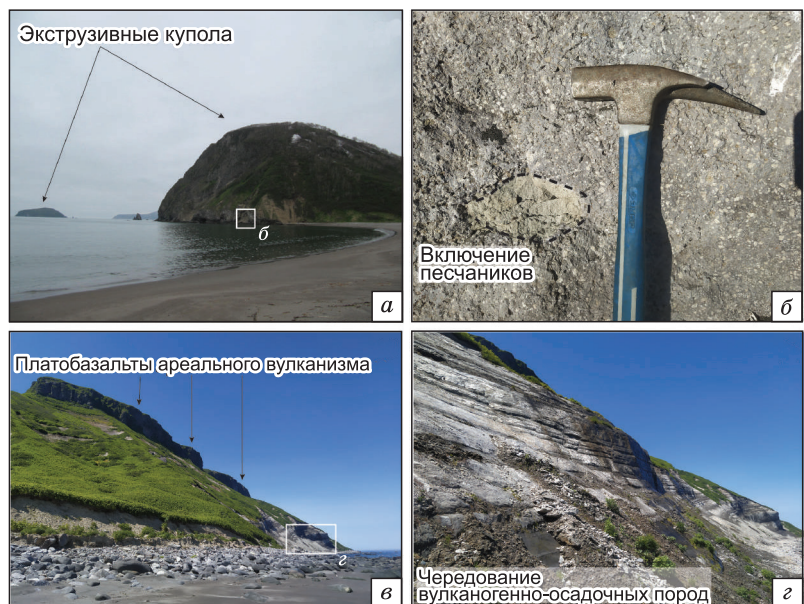


Рис. 8. Береговая линия бухты Спасения на Южной Камчатке с экструзивными куполами (а), содержащими осадочные включения (б) и обнажения переслаивающихся вулканогенно-осадочных пород вблизи м. Округлый, о. Парамушир, Северные Курилы (в, г).

прибрежной полосе Берегового хребта от Авачинской губы до бухты Вестник (см. рис. 1, б) [Государственная..., 2000]. На севере прибрежный вулканический комплекс имеет тектонические ограничения, совпадающие с границами Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций, а на западе комплекс ограничен Паратунским грабеном [Государственная..., 2000, 2006]. Ширина зоны распространения этого комплекса около 20 км, длина более 250 км (см. рис. 1 б; 8, а, б). Таким образом, можно предположить, что наличие гранитоидов в строении верхних частей земной коры позволяет считать, что кора п-ова Камчатка относится к континентальному типу и, соответственно, сам полуостров следует рассматривать как окраину континента. К сожалению, кроме геологического картирования, выполненного во второй половине прошлого века, прибрежный вулканический комплекс совершенно не изучен, не понятны условия его формирования, а имеющиеся геохронологические датировки сложно объяснить современными представлениями о формировании Камчатки [Бергаль-Кувикас, Рогозин, 2023]. В сентябре 2022 г. при поддержке Российского научного фонда была организована экспедиция по отбору материала для палеомагнитных и изотопно-геохимических исследований, благодаря которым удастся восстановить историю формирования континентальной окраины Южной Камчатки с применением современных методов исследований [Бергаль-Кувикас и др., 2022].

ВЫВОДЫ

Представленная работа основана на междисциплинарном подходе в изучении условий проявления магматизма, параметров слэба и деформаций земной поверхности в зоне перехода от континентальной окраины Камчатки к островной дуге Курильских островов. Получены следующие результаты:

1. Подтверждено, что Курильские острова и Южная Камчатка находятся под влиянием единого субдукционного процесса. В исследуемой области по данным сейсмотомографии фиксируется слэб и мантийный клин. Компиляция имеющихся в литературе геофизических данных позволила установить, что с севера на юг изучаемого района происходит увеличение возраста слэба с 92 до 106 млн лет, увеличивается скорость движения плиты с 77 до 79 км/млн лет и термальный параметр с 56 до 65 км. Масивная высокоскоростная аномалия обнаружена в районе о. Шумшу. Она имеет размеры в поперечном сечении 20×60 км и погружается под углом 45° до глубины в 40 км от о. Шумшу к поверхности слэба.

2. Отсутствие вулканизма на о. Шумшу, расположенном непосредственно вблизи Камчатки, объясняется блокирующим влиянием структуры, проявленной высокоскоростной аномалией, вероятно, связанной с погружением в зону субдукции подводного поднятия, подобного подводным горам Тихоокеанской плиты на широтах Южной Камчатки (гора Павловского) и Центральных Курил (гора Головинина).

3. Вулканизм Южной Камчатки характеризуется доминированием мощных кальдерообразующих извержений в голоцене. Увеличенная мощность земной коры и наличие миоценового прибрежного вулканического комплекса, вероятно, обуславливают формирование кислых магм. Под Северными Курилами ввиду повышенного термального параметра формируются магмы с характеристиками плавления осадков слэба. Доминирующим типом проявления вулканизма являются стратовулканы и ареальные постройки, локализующиеся в зонах разрывных нарушений, например, как на о. Парамушир.

4. Современные поднятия в зонах ареального вулканизма на о. Парамушир свидетельствуют об активном процессе формирования вулканических построек, в то время как опускание береговой линии севера о. Парамушир и подъем о. Шумшу подтверждают сегментацию дуги и, возможно, являются результатом погружения в зону субдукции океанического поднятия.

Идея написания публикации появилась благодаря геологической экскурсии на Горный Алтай, организованной в рамках Всероссийской научной конференции «Добрецовские чтения: наука из первых рук» в августе 2022 г. Авторы выражают благодарность всем организаторам конференции, посвященной памяти выдающегося ученого и организатора науки академика РАН Н.Л. Добрецова. Благодарим рецензентов д.г.-м.г.н. С.З. Смирнова и д.ф.-м.н. И.Ю. Кулакова за ценные замечания и рекомендации.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 22-77-10019, <https://rscf.ru/project/22-77-10019/>.

ЛИТЕРАТУРА

Авдейко Г.П., Бергаль-Кувикас О.В. Геодинамические условия образования адакитов и Nb-обогащенных базальтов (NEAB) на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 2015, № 5, с. 1—13.

Авдейко Г.П., Гавриленко Г.П., Бондаренко В.И. Подводная гидротермальная активность на северо-западном склоне о. Парамушир // Вулканология и сейсмология, 1984, № 6, с. 66—81.

Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волынец О.Н., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Гладков Н.Г., Палуева А.А. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги, 1992, М., Наука, 528 с.

Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. Современная тектоническая структура Курило-Камчатского региона и условия магмообразования // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский, ИВГ и ГДВО РАН, 2001, с. 9—33.

Авдейко Г.П., Савельев Д. П., Попруженко С. В., Палуева А. А. Принцип актуализма: критерии для палеотектонических реконструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2003, № 1, с. 32—59.

Авдейко Г.П., Палуева А.А., Кувикас О.В. Адакиты в зонах субдукции Тихоокеанского кольца: обзор и анализ геодинамических условий образования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2011, вып. 17, № 1, с. 45—60.

Агibalов А.О., Бергаль-Кувикас О.В., Зайцев В.А., Макеев В.М., Сенцов А.А. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа, характеризующих трещиноватость верхней части литосферы, и проявлений вулканизма Малко-Петропавловской зоны // Геофизические процессы и биосфера, 2023, № 2.

Бергаль-Кувикас О.В. Особенности пространственного проявления вулканизма Парамуширской группы, Курильская островная дуга // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2012, вып. 20, № 2, с. 194—207.

Бергаль-Кувикас О.В. Объемы четвертичных вулканитов Курильской островной дуги: анализ пространственного расположения и связь с зоной субдукции // Тихоокеанская геология, 2015, т. 34, № 2, с. 103—116.

Бергаль-Кувикас О.В., Рогозин А.Н. История исследования прибрежного вулканического комплекса в контексте истории изучения Южной Камчатки // Геодинамика и тектонофизика, 2023, т. 14, № 5.

Бергаль-Кувикас О.В., Латышев А.В., Аносова М.Б., Латанова Е.А. Экспедиция по изучению миоценовых магматических пород Южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2022, вып. 56, № 4, с. 31—44.

Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Погребенная подводная вулканическая зона к западу от о. Парамушир (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2006, вып. 8, № 2, с. 69—85.

Буслов М. М. Террейновая тектоника Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геодинамика и тектонофизика, 2014, т. 5, № 3, с. 641—665.

Буслов М.М., Ватанабе Т. Внутрисубдукционная коллизия и ее роль в эволюции аккреционного клина (на примере Курайской зоны Горного Алтая, Центральная Азия) // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (1), с. 82—93.

Буслов М.М., Джен Х., Травин А.В., Отгонббатар Д., Куликова А.В., Чен Минг, Глорис С., Семаков Н.Н., Рубанова Е.С., Абилдаева М.А., Войтишек А.Э., Трофимова Д.А. Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (10), с. 1600—1627.

Бушенкова Н.А., Кучай О.А. Механизмы очагов землетрясений в западной зоне субдукции Тихоокеанской литосферной плиты в зависимости от особенностей ее погружения // Геодинамика и тектонофизика, 2022, т. 13, № 3, с. 1—19.

Бушенкова Н.А., Бергаль-Кувикас О.В., Гордеев Е.И., Чебров Д.В., Кулаков И.Ю., Абкадыров И.Ф., Яковлев А.В., Ступина Т.А., Новгородова А.М., Дрознина С.Я. Структура надсубдукционного комплекса центральной зоны Камчатки по данным плотных сейсмологических сетей // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной дню вулканолога, 30—31 марта 2022 г. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2022, с. 95—98.

Гордеев Е.И., Бергаль-Кувикас О.В. Строение и вулканизм зоны субдукции на Камчатке // ДАН, 2022, т. 502, № 2, с. 72—76.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:200 000. Серия Южно-Камчатская. N-57-XXVII, N-57-XXXIII. Объяснительная записка. М., 2000, 300 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Камчатская. Лист N-57. Объяснительная записка. СПб, 2006, 376 с.

Кулаков И.Ю. Сейсмическая томография вулканов Камчатки // Геология и геофизика, 2022, т. 63 (11), с. 1455—1499.

Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 409 с.

Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Сафонова И.Ю., Кох Д.А. Фрагменты океанических островов в структуре Курайского и Катунского аккреционных клиньев Горного Алтая // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (12), с. 1381—1403.

Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Геодинамическая и тепловая модели зоны субдукции // Физическая мезомеханика., 2009, т. 12, № 1, с. 5—16.

Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Василевский А.Н., Жмодик С.М., Котляров А.В. Первые итоги и перспективы нового подхода к исследованию активных геологических процессов с использованием космических и наземных инструментальных измерений (на примере Камчатки и Центрально-Азиатского горного пояса) // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (1), с. 58—84.

Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / Ю.П. Масуренков. М., Наука, 1980, 171 с.

Информационная система для интеграции научных данных по наземным вулканам Камчатки и Курильских островов и подводным вулканам омывающих их морей. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, <http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/> (Дата обращения 22.12.22 г.).

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

Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Дриль С.И., Мартынов А.Ю. Зоны аномального вулканизма Курильских островов, остров Парамушир // Вестник ДВО РАН, 2009, № 4, с. 17—23.

Мартынов Ю.А., Ханчук А.И., Рыбин А.В., Мартынов А.Ю. Геохимия и петрогенезис четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Петрология, 2010, т. 18, № 5, с. 512—535.

Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана. Юнеско. М., СПб, Картография, 2003, 192 с.

Мелекесцев И.В. Эксплозивное кальдерообразующее суперизвержение Опала IV — крупнейшее на Камчатке за последние 50 тыс. лет // Вулканология и сейсмология, 2016, № 1, с. 18—32.

Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. О глубинном строении Южной Камчатки по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика, 2018, т. 9, № 4, с. 1147—1161.

Нурмухамедов А.Г., Недядько В.В., Ракитов В.А., Липатьев М.С. Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2016, вып. 29, № 1, с. 35—52.

Прошкина З.Н., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. Структура, вещественный состав и глубинное строение океанского склона Центральных Курил: новые детали // Тихоокеанская геология, 2017, т. 36, № 6, с. 58—69.

Сафонова И.Ю., Буслов М.М., Кох Д.А. Фрагменты океанической коры Палеоазиатского океана в Горном Алтае и Восточном Казахстане: геохимия и структурное положение // Литосфера, 2004, № 3, с. 84—96.

Селиверстов Н.И. Подводные морфоструктуры Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2013, 162 с.

Устиев Е.К. Некоторые основные понятия и термины в изучении о магматических формациях // Изв. АН СССР, 1976, № 10, с. 47—68.

Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М., Книжный дом, 2005, 560 с.

Хубаева О.Р., Бергаль-Кувикас О.В., Сидоров М.Д. Идентификация разрывных нарушений северной части о. Парамушир (Курильские острова, Россия) и их взаимосвязь с гидротермально-магматическими системами: 3D моделирование тектонической раздробленности // Геотектоника, 2020, № 6, с. 77—90.

Шеймович В.С., Патока М.Г. Геологическое строение зон активного кайнозойского вулканизма. М., Недра, 1989, 207 с.

Abdel-Karim A.A.M. Petrology, geochemistry and petrogenetic aspects of Younger gabbros from south Sinai: A transition from arc to active continental margin // Geochemistry, 2013, v. 73 (1), p. 89—104.

Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2002, v. 40 (11), p. 2375—2383.

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. Doctoral dissertation, Hokkaido Univ., 2015, 190 p.

Bergal-Kuvikas O., Bindeman I., Chugaev A., Larionova Yu., Perepelov A., Khubaeva O. Pleistocene-Holocene monogenetic volcanism at the Malko-Petropavlovsk zone of transverse dislocations on Kamchatka: Geochemical features and genesis // Pure Appl. Geophys., 2022, v. 179, p. 3989—4011.

Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K., Portnyagin M.V., 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 (1—2), p. 57—80.

Bindeman I.N., Leonov V.L., Colón D.P., Rogozin A.N., Shipley N., Jicha B., Loewen M.W., 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 // *Front. Earth Sci.*, 2019, v. 6, art. 238.

Bourova E., Yoshizawa K., Yomogida K. Upper mantle structure of marginal seas and subduction zones in northeastern Eurasia from Rayleigh wave tomography // *Phys. Earth Planet. Int.*, 2010, v. 183 (1—2), p. 20—32.

Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Melekestsev I.V., Bailey J. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // *Quat. Res.*, 1997, v. 47 (2), p. 125—139.

Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S., Gordeev E.I., Huang H.H., El Khrepy S., Al Arifi N. Tomographic images of magma chambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2019, v. 124 (9), p. 9694—9713.

Bushenkova N., Koulakov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E., Chebrov D., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S., Huang H. Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2023, v. 435, 107768, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107768.

Buslov M.M., Watanabe T., Saphonova I.Yu., Iwata K., Travin A., Akiyama M. Vendian-Cambrian island arc system of the Siberian continent in Gorny Altai (Russia, Central Asia) // *Gondwana Res.*, 2002, v. 5, p. 781—800.

Cloos M. Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis: Subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts // *GSA Bull.*, 1993, v. 105 (6), p. 715—737.

Collot J.-Y., Fisher M.A. Formation of forearc basins by collision between seamounts and accretionary wedges: an example from the New Hebrides subduction zone // *Geology*, 1989, v. 17 (10), p. 930—933.

Cui X., Zhu W., Fitzsimons I.C.W., Wang X., Lu Y., Wu X. A possible transition from island arc to continental arc magmatism in the eastern Jiangnan Orogen, South China: insights from a Neoproterozoic (870–860 Ma) gabbroic–dioritic complex near the Fuchuan ophiolite // *Gondwana Res.*, 2017, v. 46, p. 1—16.

Curlander J.C., McDonough R.N. Synthetic aperture radar: systems and signal processing. New York, Wiley, 1992, 672 p.

Davydova V.O., Bindeman I.N., Shchekleina M.D., Rychagov S.N. Puzhetka Caldera (South Kamchatka): Exploring temporal evolution and origin of voluminous silicic magmatism // *Petrology*, 2022, v. 30 (5), p. 462—478.

Dominguez S., Lallemand S.E., Malavieille J., von Huene R. Upper plate deformation associated with seamount subduction // *Tectonophysics*, 1998, v. 293 (3—4), p. 207—224.

Fliedner M.M., Klempner S.L. Crustal structure transition from oceanic arc to continental arc, eastern Aleutian Islands and Alaska Peninsula // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2000, v. 179 (3—4), p. 567—579.

Gamble J.A., Wright I.C., Baker J.A. Seafloor geology and petrology in the oceanic to continental transition zone of the Kermadec-Havre-Taupo Volcanic Zone arc system, New Zealand // *N. Z. J. Geol. Geophys.*, 1993, v. 36 (4), p. 417—435.

Gazel E., Hayes J.L., Ulloa A., Alfaro A., Coleman D.S., Carr M.J. The record of the transition from an oceanic arc to a young continent in the Talamanca Cordillera // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2019, v. 20 (6), p. 2733—2752.

Hanssen R.F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 2001, 308 p.

Hasegawa T., Nakagawa M., Yoshimoto M., Ishizuka Y., Hirose W., Seki S.I., Ponomareva V., Rybin A. Tephrostratigraphy and petrological study of Chikurachki and Fuss volcanoes, western Paramushir Island, northern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activity and temporal change of magma system // *Quat. Int.*, 2011, v. 246 (1—2), p. 278—297.

Isozaki Y., Maruyama S., Furuoka F. Accreted oceanic materials in Japan // *Tectonophysics*, 1990, v. 181 (1—4), p. 179—205.

Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2009, v. 99 (1), p. 194—214.

Koulakov I., Kukarina E., Fathi I.H., El Khrepy S., Al-Arifi N. Anisotropic tomography of Hokkaido reveals delamination-induced flow above a subducting slab // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2015, v. 120 (5), p. 3219—3239.

Kristenson H. InSAR On Demand! Ordering Sentinel-1 InSAR datasets from the Alaska Satellite Facility, 2022, <https://storymaps.arcgis.com/stories/68a8a3253900411185ae9eb6bb5283d3>.

Lanari R., Casu F., Manzo M., Zeni G., Berardino P., Manunta M., Pepe A. An overview of the Small Baseline Subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis // *Pure Appl. Geophys.*, 2007, v. 164, p. 637—661, doi: 10.1007/s00024-007-0192-9.

Li Z.X., Li X.H., Chung S.L., Lo C.H., Xu X., Li W.X. Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: Transition from an Andean-type to a Western Pacific-type plate boundary // *Tectonophysics*, 2012, v. 532—535, p. 271—290.

Macpherson C.G., Gamble J.A., Matthey D.P. Oxygen isotope geochemistry of lavas from an oceanic to continental arc transition, Kermadec–Hikurangi margin, SW Pacific // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, v. 160 (3—4), p. 609—621.

Manea V.C., Manea M., Kostoglodov V., Sewell G. Thermal models, magma transport, and velocity anomaly estimation beneath southern Kamchatka. PhD Dissertation. Universidad Nacional Autónoma de México, 2004, 200 p.

Martynov A.Yu. Role of backarc processes in the origin of across-arc geochemical zoning in volcanics of early evolutionary stages in Kunashir Island // *Petrology*, 2013, v. 21, 471—488.

Martynov A.Yu., Kimura J.I., Martynov Yu.A., Rybin A.V. Geochemistry of late Cenozoic lavas on Kunashir Island, Kurile Arc // *Island Arc*, 2010, v. 19 (1), p. 86—104.

Masson D.G., Parson L.M., Milsom J., Nichols G., Sikumbang N., Dwiyanto B., Kallagher H. Subduction of seamounts at the Java Trench: a view with long-range sidescan sonar // *Tectonophysics*, 1990, v. 185 (1—2), p. 51—65.

Ota T., Utsunomiya A., Uchio Y., Isozaki Y., Buslov M.M., Ishikawa A., Maruyama S., Kitajima K., Kaneko Y., Yamamoto H., Katayama I. Geology of the Gorny Altai subduction–accretion complex, southern Siberia: Tectonic evolution of an Ediacaran–Cambrian intra-oceanic arc-trench system // *J. Asian Earth Sci.*, 2007, v. 30, p. 666—695.

Portnyagin M., Savelyev D., Hoernle K., Hauff F., Garbe-Schönberg D. Mid-Cretaceous Hawaiian tholeiites preserved in Kamchatka // *Geology*, 2008, v. 36 (11), p. 903—906.

Reiners P.W., Nelson B.K., Ghiorso M.S. Assimilation of felsic crust by basaltic magma: Thermal limits and extents of crustal contamination of mantle-derived magmas // *Geology*, 1995, v. 23 (6), p. 563—566.

Sentinel-1 SAR User Guide, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar> (accessed 22.12.2022).

Sparks R.S.J. The role of crustal contamination in magma evolution through geological time // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1986, v. 78 (2—3), p. 211—223.

Stern R.J. Subduction zones // *Rev. Geophys.*, 2002, v. 40 (4), p. 3—38.

Syracuse E.M., Abers G.A. Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2006, v. 7 (5), Q05017.

Tamura Y., Tatsumi Y., Zhao D., Kido Y., Shukuno H. Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 197 (1—2), p. 105—116.

The General Bathymetric Chart of the Oceans, as of June 2022. GEBCO Compilation Group (2022) GEBCO 2022 Grid, doi: 10.5285/e0f0bb80-ab44-2739-e053-6c86abc0289c.

Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Chen C.H. Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1999, v. 91 (1), p. 23—42.

Wan B., Wang X., Liu X., Cai K., Xiao W., Mitchell R.N. Long-lived seamount subduction in ancient orogens: Evidence from the Paleozoic South Tianshan // *Geology*, 2021, v. 49 (5), p. 531—535.