

УДК 551.1/4

ВЗАИМОСВЯЗЬ ВЫРАЖЕННОЙ В РЕЛЬЕФЕ МЕГАТРЕЩИНОВАТОСТИ НА ЮГО-ВОСТОКЕ КАМЧАТКИ С ВУЛКАНИЗМОМ И ТЕРМИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЛИТОСФЕРЫ

© 2024 г. А.О. Агибалов^{1,2,3*}, О.В. Бергаль-Кувикас^{1,4}, В.А. Зайцев², А.А. Сенцов³

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

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
геологический факультет, г. Москва, Россия

³Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

⁴Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

*e-mail: agibalo@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.07.2024 г.; после доработки 27.08.2024 г.

Принята к публикации 03.09.2024 г.

Аннотация. С помощью геоморфологических методов выделены области повышенной мегатрещиноватости на юго-востоке Камчатки, отличающиеся высокой коровой сейсмичностью и пониженными значениями температуры на глубине 1 км. Установлено, что в более прогретых областях концентрации вулканов и горячих источников поверхностная трещиноватость развита слабо, поскольку повышение температуры верхней части литосферы приводит к доминированию пластических деформаций над хрупкими. На примере выбранного участка показаны возможности структурно-геоморфологического и морфометрического методов для выделения областей, находящихся в разном геотермическом состоянии, которое во многом обуславливает не только рельеф и сейсмичность, но и эколого-ландшафтный облик территории в целом, включая ее флористические и фаунистические особенности.

Ключевые слова: юго-восток Камчатки, мегатрещиноватость, анализ рельефа.

DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2024.4-8>

Цитирование: Агибалов А.О., Бергаль-Кувикас О.В., Зайцев В.А., Сенцов А.А. Взаимосвязь выраженной в рельефе мегатрещиноватости на юго-востоке Камчатки с вулканизмом и термическим состоянием верхней части литосферы // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23, № 4. С. 105–114. <https://doi.org/10.21455/GPB2024.4-8>

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вулканы Камчатки относятся к уникальным природным объектам, включенным ЮНЕСКО в список Всемирного природного и культурного наследия. Значительная их часть (в том числе Авачинский, Корякский, Бакенинг) расположена на юго-востоке полуострова в пределах Восточного хребта. С вулканами связаны многочисленные термальные источники, а также гейзерные поля [Кирюхин, Сугробов, 2019], среди которых одно из наиболее крупных в мире – Долина гейзеров на территории Кроноцкого биосферного заповедника. Высокая гидротермально-магматическая активность Камчатки в целом обусловлена субдукционным взаимодействием Тихоокеанской и Охотоморской литосферных плит, сопровождающимся интенсивной сейсмичностью. Современный вулканизм и сейсмичность не только формируют рельеф и эколого-ландшафтный облик территории, но являются одними из наиболее опасных геологических процессов, во многом опреде-

ляющих жизнь крупных городов на полуострове – Петропавловска-Камчатского, Вилючинска, Елизово.

Проявления геологических процессов главным образом обусловлены характером тектонической раздробленности геосреды, поскольку по трещинам разного масштабного уровня происходит движение магматических масс и миграция флюидов [Kiryukhin et al., 2023], а динамические подвижки по разломам инициируют сейсмические события [Zelenin et al., 2020]. Современные возможности геоморфологических методов и программного обеспечения позволяют на количественном уровне проанализировать взаимосвязь выраженной в рельефе мегатрещиноватости, вулканизма и сейсмичности. Частично этот вопрос рассматривался нами ранее на примере Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций [Агибалов и др., 2023]. В рамках настоящего исследования увеличение площади выбранного региона и привлечение большего количества исходных материалов помогло уточнить и расширить представления о связи трещиноватости, гидротермально-магматической активности и локализации

эпицентров малоглубинных коровых землетрясений на территории Курило-Камчатского региона, дополнив и расширив имеющиеся по данной тематике представления (см, например, [Леонов, 1994; Леонов, Иванов, 1994; Хренов и др., 2002; Шкарин, Шаповалов, 2006; Ермаков и др., 2014; Хубаева и др., 2020]).

МЕГАТРЕЩИНОВАТОСТЬ И БИОСФЕРА

В настоящее время не вызывает сомнения значимость конфигурации зон трещиноватости верхней части земной коры как одного из факторов вулканизма, поскольку эти зоны могут служить каналами, по которым магматические массы поднимаются на поверхность [Белашев, 2010]. В свою очередь, вулканизму принадлежит одна из ведущих ролей в формировании природной среды и биосферы в целом [Рашидов, 2013]. Он во многом обуславливает динамику процессов, происходящих на разных ее уровнях – от расположенной в недрах Земли нижней границы, через которую проходят мощные потоки вещества (в том числе флюидно-магматические расплавы), до самой верхней, поскольку вулканический пепел может подниматься на высоту до ~20 км [Полярков, Бабаназарова, 2007].

Известно, что попадание в атмосферу большого объема вулканического пепла и пыли изменяет ее оптические свойства. Отражение солнечной радиации от вулканических частиц приводит к снижению температуры воздуха. Вулканические газы во многом обуславливают химизм среды: так, в вулканических областях бывают кислые дожди с рН 2.4–2.5 и минерализацией до 250 мг/л [Хинтуба, Эмба, 2019]. А согласно В.И. Вернадскому [1960], поле устойчивости жизни определяют пять основных факторов: температура, давление, фаза среды, химизм среды и лучистая энергия. Кроме того, вулканические процессы формируют два из пяти выделенных В.В. Докучаевым [1950] факторов почвообразования – материнские породы (к которым относятся в том числе вулканиты) и рельеф, основными формами которого на Камчатке являются крупные стратовулканы.

Как показано нами в работе [Агибалов и др., 2023], с зонами мегатрещиноватости Малко-Петропавловской зоны Камчатки связаны термальные источники. В статье [Тахтеев и др., 2010] подробно описано влияние таких источников на флористические и фаунистические особенности Байкальского региона, в котором сохранились реликтовые (термо- и галофильные) виды и эндемики. Имеются работы с описанием биоты термальных озер и источников Камчатки (см., например, [Марков, Зеленков, 2014; Никулина, Грищенко, 2017]).

Известно, что по зонам мегатрещиноватости происходит миграция флюидов. По мнению [Горьковец, Белашев, 2014], повышенная концентрация подпочвенного радона способствует ростовым аномалиям деревьев и возникновению крупных муравейников в Карелии. На наш взгляд, эта точка зрения дискуссионна: нами проводились измерения объемной активности радона в этом регионе, положительные аномалии которой маркируют выраженные в рельефе зоны трещиноватости [Агибалов и др., 2020]. Нередко они представляют собой линейные понижения с крутыми стенками, по бортам которых растет лес, а днище заболочено или

покрыто полевой растительностью. Таким образом, ростовые аномалии деревьев и крупные муравейники приурочены к кромке леса, отличающейся повышенной освещенностью. В то же время хорошо изучен подток минерализованных вод по зонам трещиноватости, отражающийся в элементном составе коры деревьев [Главатских, 1992], а для территории Камчатки показано, что ртутная дегазация связана не только с вулканами, но и с зонами мегатрещиноватости, достигающими большой глубины [Озерова, Озеров, 2009]. Изучение этого процесса имеет большое практическое значение, поскольку ртуть является глобальным загрязнителем 1-го класса опасности во всех средах и оказывает токсичное воздействие на биоту вне зависимости от дозы [Богданова и др., 2020].

Из вышесказанного следует, что изучение степени тектонической раздробленности геосреды – крайне актуальная задача.

КРАТКИЙ ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая нами территория расположена в пределах двух геоморфологических областей – складчато-глыбового Восточного хребта с вулканами и Вулканического нагорья (рис. 1). Она простирается с севера на юг от Кроноцкого полуострова до пос. Паужетка и ограничена с запада равниной Центральной Камчатской депрессии [Национальный..., 2007]. Здесь развит горный вулканический рельеф; наивысшая высотная отметка – 3482 м (Кроноцкая сопка) (см. рис. 1). Его формирование началось с позднего плиоцена и активно продолжается по настоящее время под влиянием двух главных факторов – тектонических движений и вулканизма [Брайцева и др., 1970].

Районы наиболее активной вулканической деятельности находятся в восточной и юго-западной частях территории, где расположены вулканические Восточно- и Южно-Камчатский хребты [Короновский, 2011]. Они сложены преимущественно верхнеолигоцен–миоценовыми эффузивно-экструзивными и пирокластическими породами разного состава – от базальтов до дацитов и риодацитов с преобладанием андезитов и андезидацитов [Авдейко и др., 2001]. Эти хребты наложены на Восточно-Камчатское поднятие позднемиоценового–эоценового возраста, западная часть которого относится к Ачайваам-Валагинскому террейну – палеоостровной дуге, развивавшейся в позднемиоценовое–палеоценовое время. После ее отмирания и последующего погружения сформировались палеоцен–раннеэоценовые терригенные флишевые толщи. На Кроноцком и Шипунском полуостровах развиты субаквальные надсубдукционные вулканиты Кроноцко-Командорской островной дуги, существовавшей в позднем мелу–олигоцене [Шапиро, Соловьев, 2009]. Все упомянутые островодужные комплексы дислоцированы в син- и антиформы и нарушены многочисленными надвигами. К востоку от с. Малки на поверхность выходят метаморфические образования разного возраста по породам Омгоно-Укэляятского (подводного терригенного шлейфа Азиатского континента) и Ачайваам-Валагинского (островодужного) террейнов [Шапиро, Соловьев, 2009; Короновский, 2011] (рис. 2).

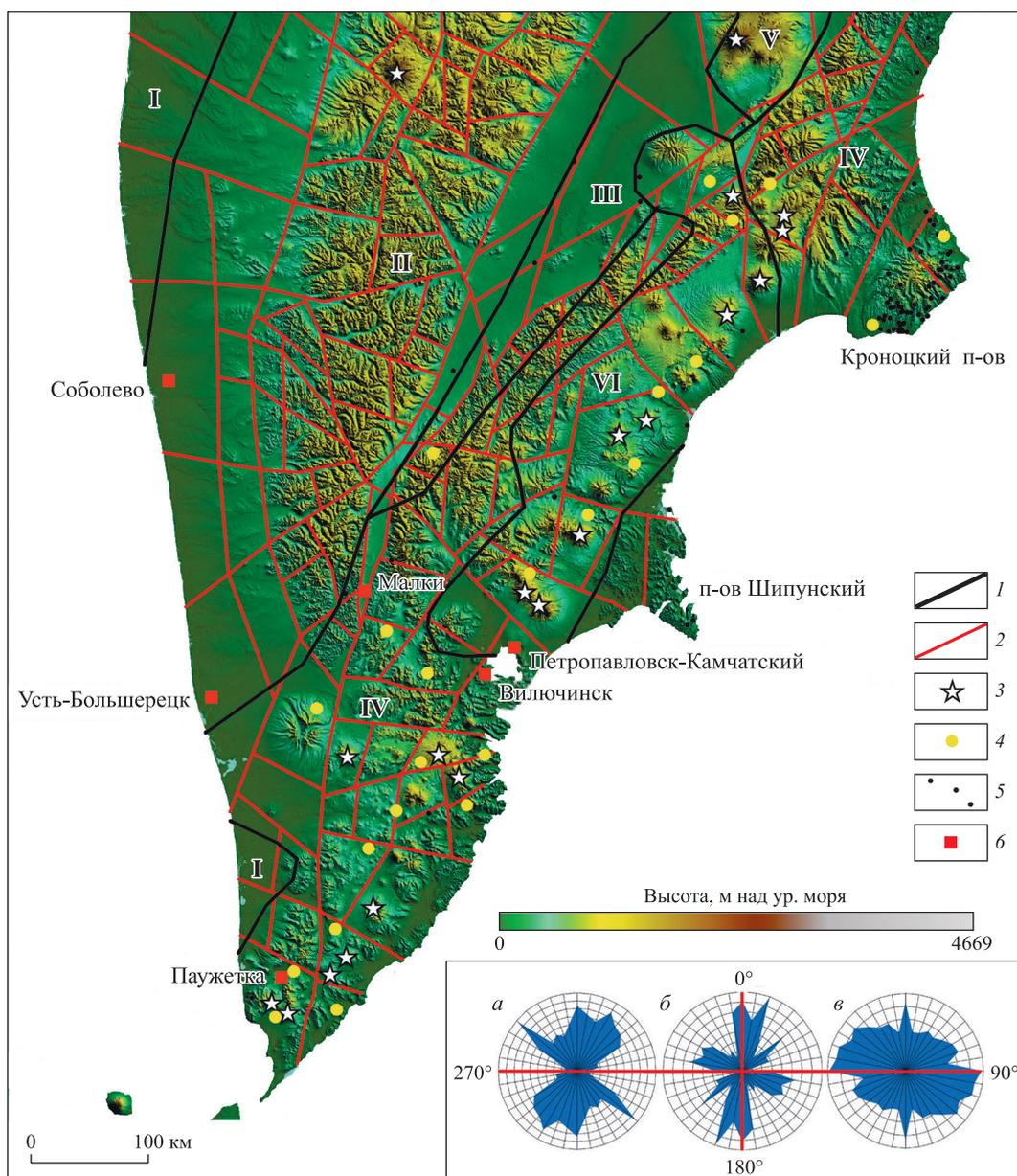


Рис. 1. Схема линеаментов Южной Камчатки и розы-диаграммы простираний разломов (а), линеаментов (б) и водотоков (в)

1 – границы геоморфологических регионов (по [Национальный..., 2007]); 2 – линеаменты, 3 – вулканы (по [Государственная..., 1981]); 4 – горячие источники (по [Геотермическая..., 1995]); 5 – эпицентры малоглубинных землетрясений (по [Каталог..., 2024]); 6 – населенные пункты. I–VI – геоморфологические регионы: I – Западная Камчатская прибрежная равнина; II – складчато-глыбовый Срединный хребет; III – равнина Центральной Камчатской депрессии; IV – складчато-глыбовый Восточный хребет; V – Ключевская группа вулканов; VI – Вулканическое нагорье

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа характера мегатрещиноватости выполнен структурно-геоморфологический анализ цифровой модели рельефа (ЦМР) разрешением 1 угл. с (~30 м) [SRTM..., 2024] по методике Н.П. Костенко [1999]. Методика предполагает выделение линеаментов по рисунку гидросети, резким перегибам склонов, уступам. Линеаменты формируют блоковую структуру, при этом блоки имеют форму, близкую к прямоугольной

или трапецевидной. Отраженные на розах-диаграммах доминирующие ориентации линеаментов были сопоставлены с основными направлениями простирания разломов, показанных на геологических картах масштаба 1 : 200 000 [База..., 2024], и водотоков (см. базу данных в [Lehner, Grill, 2013]). Средние круговые значения азимутов простираний определялись по формуле, приведенной в [Каждан, Гуськов, 1990]. Для оценки степени раздробленности верхней части литосферы в программе ArcMap рассчитывалась плотность разломов, линеаментов и водотоков.

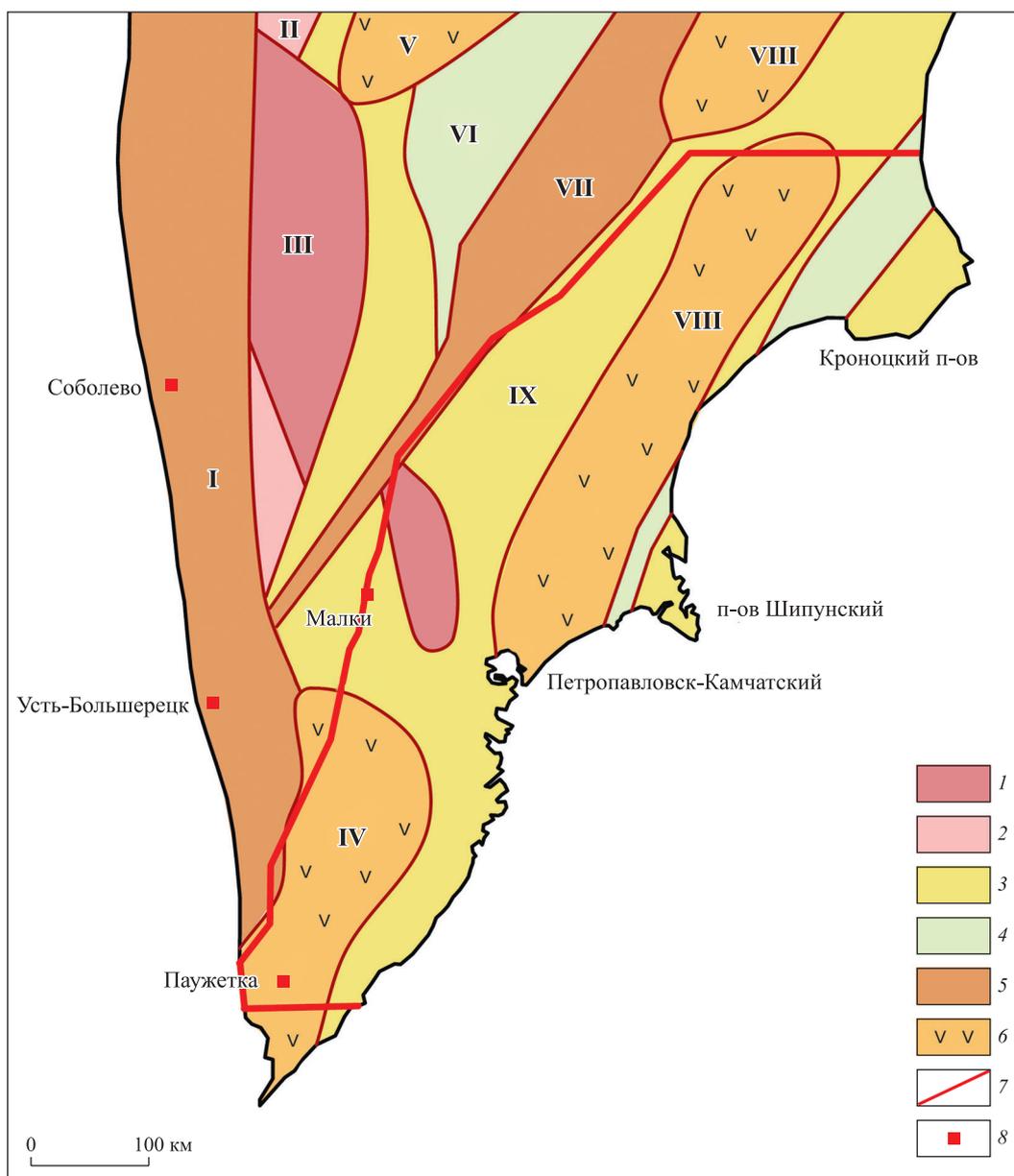


Рис. 2. Основные геологические структуры Южной Камчатки (по [Короновский, 2011] с изм.)

1 – метаморфические породы кристаллического фундамента; 2 – поздне меловые–палеоценовые образования; 3 – поздне меловые–эоценовые образования; 4 – эоцен–миоценовые образования; 5 – миоцен–четвертичные образования; 6 – образования вулканических хребтов; 7 – контуры рассмотренного более детально на рис. 3 участка (юго-восток Камчатки); 8 – населенные пункты. I–IX – геологические структуры: I – Большерецкий прогиб; II – Тигильское поднятие; III – поднятие Срединного хребта; IV – вулканический Южно-Камчатский хребет; V – вулканический Срединно-Камчатский хребет; VI – Центрально-Камчатский прогиб; VII – Срединно-Камчатский грабен; VIII – вулканический Восточно-Камчатский хребет; IX – Восточно-Камчатское поднятие

Глубина вертикального расчленения и крутизна склонов – одни из наиболее информативных морфометрических параметров рельефа, характеризующих мегатрещиноватость [Нетребин, 2012; Агибалов и др., 2023]. Глубина вертикального расчленения определялась как разность высот в окрестности радиусом $R = 90$ м каждой точки ЦМР с помощью инструмента «Focal statistics». Для того чтобы на количественном уровне оценить взаимосвязь между пространственным распределением разломов и рассчитанными нами морфометрическими параметрами рельефа, с использованием программы

SPSS Statistics 17.0 были получены значения рангового коэффициента корреляции Спирмена между плотностью линейментов и разломов, а также между плотностью разломов, глубиной вертикального расчленения и крутизной склонов. Этот коэффициент используется в непараметрической статистике и выбран потому, что характер распределения ряда параметров отличается от нормального. Оценка существенности корреляционной связи выполнена путем сопоставления расчетного ($t_{расч}$) и критического ($t_{крит}$) значений t -критерия Стьюдента [Сизова, 2013]. Во всех случаях $t_{расч} \gg t_{крит}$

для уровня доверительной вероятности $\alpha = 0.99$, поэтому корреляция значима.

Полученные данные о мегатрещиноватости сопоставлены с информацией о расположении вулканических построек разного масштаба (от крупных стратовулканов до моногенных лавовых конусов, $N = 647$) [База..., 2024], горячих источников ($N = 66$) [Электронная..., 2024] и эпицентров малоглубинных ($h \leq 45$ км) тектонических землетрясений магнитудой $ML \geq 4.5$ ($N = 78$) [Каталог..., 2024]. Ограничение по глубине установлено по причине малой информативности геоморфологических данных для изучения процессов, происходящих в глубоких недрах. На схемах плотности разломов, линеаментов и водотоков, а также глубины вертикального расчленения рельефа и крутизны склонов выделены положительные аномалии, где значения соответствующих параметров превышают медиану. Рассчитана доля вулканических построек, горячих источников и эпицентров землетрясений, попадающих в эти аномалии, что позволило статистически оценить степень взаимосвязи мегатрещиноватости с гидротермально-магматическими проявлениями и сейсмичностью.

Опробованный на примере юго-востока Камчатки подход применен также для всей территории Южной Камчатки – от Кроноцкого полуострова на севере до м. Лопатка на юге. Поскольку геологических карт масштаба 1 : 200 000 в открытом доступе нет, исследования проводились в обзорном масштабе 1 : 1 000 000. Данные о конфигурации разломов и расположении самых крупных вулканов ($N = 20$) приведены по [Государственная..., 1981], основных горячих источников ($N = 24$) по [Геотермическая..., 1995]. Количество рассмотренных эпицентров малоглубинных землетрясений составляло 89, а при расчете глубины вертикального расчленения использовалось значение $R = 450$ м.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для территории Юго-Восточной Камчатки установлено, что большинство вулканических построек и горячих источников расположено в областях, отличающихся слаборасчлененным рельефом, где значения плотности разломов, линеаментов и водотоков, а также глубины вертикального расчленения рельефа ниже медианы. Обратная закономерность характерна для эпицентров малоглубинных землетрясений: они приурочены к положительным аномалиям упомянутых параметров (местам, где их значения выше медианных), характеризующих мегатрещиноватость (табл. 1).

Такой характер взаимосвязи указывает на связь вулканических построек и горячих источников с областями преобладания пластических деформаций, в которых поверхностная трещиноватость активно не проявляется. Возникновение пластических деформаций можно объяснить прогревом верхней части литосферы, вызванным наличием магматических камер под вулканическими постройками: 88 % таких построек расположено в областях, где значение температуры на глубине 1 км превышает медиану. Данные сейсмической томографии свидетельствуют о наличии расплавов и насыщенных флюидами сред в верхней коре не только под активными вулканами, но и под гидротермально-магматическими системами [Bushenkova et al., 2023].

В свою очередь, эпицентры малоглубинных землетрясений приурочены преимущественно к областям повышенной раздробленности геосреды, где преобладают хрупкие деформации. Эти области прогреты в значительно меньшей степени, чем вулканами: 95 % эпицентров локализовано в зонах, где значение температуры на глубине 1 км ниже медианного. По данным А.И. Кожурина и Т.К. Пинегиной [2024],

Таблица 1. Взаимосвязь характеризующих мегатрещиноватость параметров геосреды с локализацией вулканических построек, горячих источников и эпицентров малоглубинных землетрясений на юго-востоке Камчатки

Параметры геосреды	Области с параметрами геосреды ниже медианных значений		Области с параметрами геосреды выше медианных значений
	Доля вулканических построек	Доля горячих источников	Доля эпицентров малоглубинных землетрясений
Плотность:			
разломов	0.85	0.56	0.88
линеаментов	0.70	0.65	≤ 0.5
водотоков	0.57	≤ 0.5	≤ 0.5
Глубина вертикального расчленения рельефа	0.54	0.64	0.55
Крутизна склонов	0.52	0.67	0.58
Преобладающие деформации	Пластические		Хрупкие

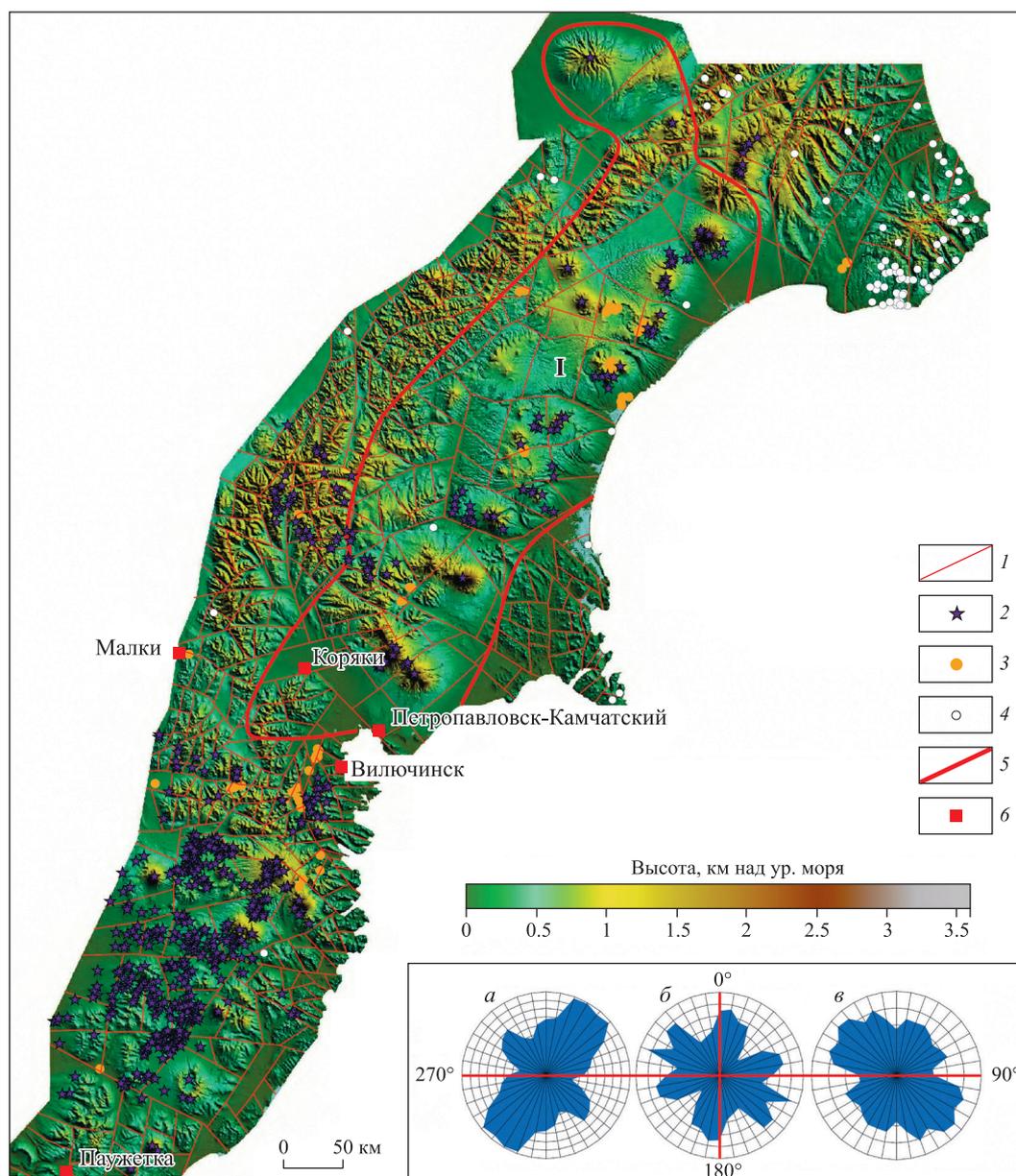


Рис. 3. Схема линеаментов юго-востока Камчатки и розы-диаграммы простираний разломов (а), линеаментов (б) и водотоков (в)

1 – линеаменты; 2 – вулканические постройки; 3 – горячие источники; 4 – эпицентры малоглубинных землетрясений; 5 – граница Вулканического нагорья (по [Национальный..., 2007]); 6 – населенные пункты

приуроченность большинства коровых землетрясений и разрывных нарушений к Кроноцкому полуострову может быть связана с разной степенью деформации восточных полуостровов Камчатки, вызванной коллизией Алеутской дуги.

Кроме того, была установлена заметная (по шкале Чеддока) взаимосвязь между плотностью разломов и выраженностью линеаментов: коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r) составляет 0.58. На розах-диаграммах простираний разломов, линеаментов и водотоков выражены два главных направления – северо-западное и северо-восточное, а средние круговые значения азимуты простирания достаточно близки

и составляют 74, 73 и 88° соответственно (рис. 3). Эти данные указывают на информативность структурно-геоморфологического метода для выделения областей проявления хрупких и пластических деформаций.

Аналогичный результат получен в обзорном масштабе для всей территории Южной Камчатки: большинство вулканических построек и горячих источников приурочено к областям пониженной плотности разломов и линеаментов, а малоглубинные землетрясения происходят в основном в областях повышенной раздробленности, где плотность разломов, глубина вертикального расчленения рельефа и крутизна склонов выше медианных значений (табл. 2). 93 % эпицентров

Таблица 2. Взаимосвязь характеризующих мегатрещиноватость параметров геосреды с локализацией вулканических построек, горячих источников и эпицентров малоглубинных землетрясений на территории Южной Камчатки

Параметры геосреды	Области с параметрами геосреды ниже медианных значений		Области с параметрами геосреды выше медианных значений
	Доля вулканических построек	Доля горячих источников	Доля эпицентров малоглубинных землетрясений
Плотность:			
разломов	0.80	0.54	0.53
линеаментов	0.70	0.51	Не опр.
Глубина вертикального расчленения рельефа	Не опр.		0.76
Крутизна склонов	"		0.74
Преобладающие деформации	Пластические		Хрупкие

землетрясений приходится на слабопрогретые области, где значение температуры на глубине 1 км ниже медианного.

Кроме того, установлена умеренная корреляция между плотностью разломов и глубиной вертикального расчленения рельефа ($r = 0.39$), а также между плотностью разломов и крутизной склонов – $r = 0.38$. Эти значения указывают на соответствие разломам в рельефе хорошо выраженных уступов и крутых склонов. Однако сходство ориентаций разломов, линеаментов и водотоков на территории Южной Камчатки значительно меньше, чем на юго-востоке полуострова: средние круговые значения азимутов простираения составляют 73, 55 и 92° соответственно (см. рис. 1).

РЕЗЮМЕ

В результате проведенных исследований установлено, что выраженная в рельефе юго-востока Камчатки мегатрещиноватость маркирует относительно холодные области преобладания хрупких деформаций, где происходит большинство коровых землетрясений, в то время как вулканические постройки и горячие источники связаны с более прогретыми зонами пластических деформаций, неблагоприятными для развития поверхностной трещиноватости. Этот результат интересен в методическом отношении, поскольку показывает возможности структурно-геоморфологических и морфометрических методов для выделения участков земной коры, находящихся в разном геотермическом состоянии. В свою очередь, геотермическое состояние во многом обуславливает не только характер современной деформации, но и влияет на эколого-ландшафтный облик территории в целом, включая ее флористические и фаунистические особенности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 22-77-10019 «Ревизия геодинамической эволюции Южной Камчатки и оценка вулканоопасности Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций на основе геохимических, изотопно-геохронологических и палеомагнитных исследований вулканических завойковского комплекса» (<https://rscf.ru/project/22-77-10019/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- 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: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. С. 9–33.
- Агibalов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А. Выделение активных докембрийских морфоструктур Северного Приладожья по комплексу геолого-геоморфологических данных // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 4. С. 64–70.
- 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. Т. 22, № 2. С. 122–133.
- База данных государственных геологических карт. URL: <https://webmapget.vsegei.ru/> (Дата обращения: 10.01.2024 г.)

- Белашев Б.З. Геофизические применения статистической модели // Вестн. РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика. 2010. № 3 (2). С. 41–44.
- Богданова А.М., Евстафьева Е.В., Барановская Н.В., Ляпина Е.Е., Тымченко С.Л., Большунова Т.С. Территориальные особенности распределения ртуты в эпифитных лишайниках Крымского полуострова // Вестн. Том. гос. ун-та. 2020. № 50. С. 135–156.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Кожемяка Н.Н. Основные этапы формирования рельефа Камчатки // Геоморфология. 1970. № 3. С. 24–31.
- Вернадский В.И. Биосфера: Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 5. 422 с.
- Геотермическая карта России. М-6 1 : 10 000 000 / Ред. А.А. Смыслов. СПб.: ВСЕГЕИ, 1995.
- Главатских С.П. Геохимические критерии и методы поисков алмазоносных кимберлитов (на примере архангельской кимберлитовой провинции): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1992. 211 с.
- Горьковец В.Я., Белашев Б.З. Геологические структуры Зеленого пояса Фенноскандии и их геоэкологическая роль // Тр. КарНЦ РАН. 2014. № 6. С. 4–16.
- Государственная геологическая карта СССР. (Нов. сер.). Л. N-(56), 57 (Петропавловск-Камчатский). М-6 1 : 1 000 000 / Ред. Ю.А. Альбов. Л.: ВСЕГЕИ, 1981.
- Докучаев В.В. Сочинения. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. Т. 4, ч. 1. 413 с.
- Ермаков В.А., Гонтовая Л.И., Сенюков С.Л. Тектонические условия и магматические источники нового Толбачинского трещинного извержения (п-ов Камчатка) // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 1. С. 5–33.
- Каждан А.Б., Гуськов О.И. Математические методы в геологии: Учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 251 с.
- Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 – наст. вр). URL: <https://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (Дата обращения: 01.04.2024 г.)
- Кириухин А.В., Сугробов В.М. Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65.
- Кожурин А.И., Пинегина Т.К. Активная тектоника восточных полуостровов Камчатки // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXVII ежегод. науч. конф., посвященной Дню вулканолога, г. Петропавловск-Камчатский, 27–29 марта 2024 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 176–179.
- Короновский Н.В. Геология России и сопредельных территорий. М.: Академия, 2011. 240 с.
- Костенко Н.П. Геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1999. 398 с.
- Леонов В.Л. Линеаменты, трещиноватость и устойчивость склонов Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 44–63.
- Леонов В.Л., Иванов В.В. Землетрясения Карымского вулканического центра и их связь с тектоникой // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 24–40.
- Марков М.В., Зеленков В.Н. Некоторые результаты изучения биоты камчатских гидротерм экспедициями РАЕН // Вестн. РАЕН. 2014. Т. 14, № 6. С. 8–18.
- Национальный атлас России. В 4 т. / Сост. и подгот. к изданию ПКО «Картография» под общ. рук. М-ва транспорта Российской Федерации и Роскартографии; отв. ред. Г. Кравченко; пред. редкол. А.В. Бородко. Калининград: ОАО Янтарный сказ, 2007. Т. 2. Природа и экология. 495 с.
- Нетребин П.Б. Морфометрический анализ рельефа Большого Кавказа: Дис. ... канд. геогр. наук. Краснодар, 2012. 227 с.
- Никулина Т.В., Грищенко О.В. Флора диатомовых водорослей Дачных термальных источников (Камчатка, Россия) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова, г. Владивосток, 20–23 марта 2017 г. Владивосток: Дальнаука, 2017. Вып 7. С. 185–193.
- Озерова Н.А., Озеров А.Ю. О процессах ртутной дегазации в Камчатском регионе и формировании современной ртутной минерализации из газовой фазы // Материалы IV Всерос. симп. по вулканологии и палеовулканологии, г. Петропавловск-Камчатский, 22–27 сентября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. Т. 2. С. 786–789.
- Поярков Б.В., Бабаназарова О.В. Учение о биосфере и переходе ее в ноосферу. Ярославль: ЯрГУ, 2007. 320 с.
- Рашидов В.А. Побочный вулкан Такетоми (о. Атласова, Курильская островная дуга) // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12, № 1. С. 5–13.
- Сизова Т.М. Статистика: Учеб. пособие. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2013. 176 с.
- Тахтеев В.В., Плешанов А.С., Егорова И.Н., Судакова Е.А., Окунева Г.Л., Помазкова Г.И., Ситникова Т.Я., Кравцова Л.С., Рожкова Н.А., Галимзянова А.В. Основные особенности и формирование водной и наземной биоты термальных и минеральных источников Байкальского региона // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2010. Т. 3, № 1. С. 33–37.
- Хинтуба Л.В., Экба Я.А. Влияние стратосферного аэрозоля на температуру приземного слоя воздуха // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Республика Адыгея, г. Майкоп, 20–24 мая 2019 г. Майкоп: ИП Кучеренко В.О., 2019. Ч. 2. С. 225–232.
- Хренов А.П., Маханова Т.М., Богатиков О.А., Платэ А.Н. Результаты аэрокосмических исследований вулканов Камчатки (Ключевская группа вулканов) // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 3–20.
- 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.
- Шапиро Н.М., Соловьев В.А. Кинематическая модель формирования Олоторско-Камчатской складчатой области // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 8. С. 863–880.
- Шкарин В.Е., Шаповалов Д.А. Использование данных радиолокационной космической съемки для исследования районов современного вулканизма (на примере

- Ключевской группы вулканов) // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 79–88.
- Электронная база данных топографических карт. URL: <http://www.etomesto.ru/map-genshtab/> (Дата обращения: 02.01.2024 г.)
- Bushenkova N., Koulakov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E.I., Chebrov D.V., Huang H.H.* Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // *J. Volcan. and Geotherm. Res.* 2023. V. 435. P. 107768.
- Kiryukhin A.V., Bergal-Kuvikas O.V., Lemzikov M.V.* Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano triggering eruptions of Bezymianny volcano based on seismological and petrological data // *J. Volcan. and Geotherm. Res.* 2023. V. 442. P. 107892.
- Lehner B., Grill G.* Global river hydrography and network routing: Baseline data and new approaches to study the world's large river systems // *Hydrolog. Proc.* 2013. V. 27. P. 2171–2186.
- SRTM Worldwide elevation data (1-arc-second resolution, SRTM Plus V3). URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1nv003/> (Date of access: 10.01.2024)
- Zelenin E., Kozhurin A., Portnyagin M.V., Ponomareva V.V.* Tephrochronological dating of paleoearthquakes in active volcanic arcs: A case of the Eastern Volcanic Front on the Kamchatka Peninsula (Northwest Pacific) // *J. Quatern. Sci.* 2020. V. 35, N 1–2. P. 349–361.

Сведения об авторах

АГИБАЛОВ Алексей Олегович – кандидат геолого-минералогических наук, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Россия, 683023, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, д. 9; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1; Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: agibalo@yandex.ru

БЕРГАЛЬ-КУВИКАС Ольга Валерьевна – кандидат геолого-минералогических наук, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Россия, 683023, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, д. 9; Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга. Россия, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, д. 4. E-mail: kuvikas@mail.ru

ЗАЙЦЕВ Владимир Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1. E-mail: v.zaitsev@mail.ru

СЕНЦОВ Алексей Андреевич – кандидат геолого-минералогических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: alekssencov@yandex.ru

RELATIONSHIP OF MEGAFRACTURING EXPRESSED IN THE RELIEF OF SOUTHEAST KAMCHATKA WITH VOLCANISM AND THERMAL CONDITION OF THE UPPER PART OF THE LITHOSPHERE

© 2024 **A.O. Agibalov^{1,2,3*}, O.V. Bergal-Kuvikas^{1,4}, V.A. Zaitsev², A.A. Sentsov³**

¹ Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴ Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

*e-mail: agibalo@yandex.ru

Abstract. Geomorphological methods have been used to identify areas of increased megafracture in the south-east of Kamchatka, characterized by high crustal seismicity and low temperature values at a depth of 1 km. It has been established that warmer areas of concentration of volcanoes and hot springs are not favorable for the development of surface fracturing, since an increase in temperature leads to the dominance of plastic deformations over brittle ones. Thus, using the example of the selected area, the possibilities of structural-geomorphological and morphometric analysis of the relief are shown to identify areas in different geothermal states, which largely determine not only the relief and seismicity, but also the ecological and landscape appearance of the territory as a whole including its floristic and faunistic features.

Keywords: southeast of Kamchatka, megafractures, relief analysis.

About the authors

AGIBALOV Alexey Olegovich – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences. Russia, 683023, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piipa boul., 9; Lomonsov Moscow State University, Faculty of Geology. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1; Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. E-mail: agibalo@yandex.ru

BERGAL-KUVIKAS Olga Valerievna – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences. Russia, 683023, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piipa boul., 9; Vitus Bering Kamchatka State University. Russia, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya st., 4. E-mail: kuvikas@mail.ru

ZAITSEV Vladimir Aleksandrovich – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Lomonsov Moscow State University, Faculty of Geology. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1. E-mail: v.zaitsev@mail.ru

SENTSOV Alexey Andreevich – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. E-mail: alekssencov@yandex.ru

Cite this article as: Agibalov A.O., Bergal-Kuvikas O.V., Zaitsev V.A., Sentsov A.A. Relationship of megafracturing expressed in the relief of southeast Kamchatka with volcanism and thermal condition of the upper part of the lithosphere, *Geofizicheskie processy i biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2024, vol. 23, no. 4, pp. 105–114 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/GPB2024.4-8>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2024, vol. 60. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>