

УДК 911.9

ВЗАИМОСВЯЗЬ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ТРЕЩИНОВАТОСТЬ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЛИТОСФЕРЫ, И ПРОЯВЛЕНИЙ ВУЛКАНИЗМА МАЛКО-ПЕТРОПАВЛОВСКОЙ ЗОНЫ

© 2023 г. А.О. Агibalов^{1,2*}, О.В. Бергаль-Кувикас², В.А. Зайцев³, В.М. Макеев⁴, А.А. Сенцов¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, Россия

⁴ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия

*e-mail: agibalo@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.02.2023 г.; после доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2023 г.

Аннотация. Установлено, что многочисленные моногенные вулканические постройки и выходы термальных вод в Малко-Петропавловской зоне поперечных дислокаций (МПЗ) на п-ове Камчатка локализованы в областях повышенной трещиноватости верхней части земной коры. В статье на количественном уровне охарактеризована приуроченность проявлений вулканизма и гидротермально-магматических систем к положительным аномалиям морфометрических характеристик рельефа (удельной длины «слабых» зон и водотоков, плотности узлов пересечения рек и линеаментов, дисперсии экспозиции склонов). Выявлена высокая степень согласованности ориентировок разломов и «слабых» зон: на обеих розах-диаграммах проявлены северо-западное, меридиональное и северо-восточное направления, а средние круговые значения их простираний составляют 75 и 76° соответственно. По методике Ю.В. Нечаева (ИФЗ РАН) на основе расчета удельных длин «слабых» зон и водотоков получены 3D-модели тектонической раздробленности земной коры в интервале глубин 2.5–10 км. Коэффициент корреляции Пирсона между точечными элементами этих воксельных моделей составляет 0.86. Выявленная взаимосвязь между морфометрическими характеристиками и проявлениями вулканизма позволила предположить, что в целом характер находящей отражение в рельефе трещиноватости служит одним из основных факторов, определяющих гидротермально-магматическую активность района исследований, которая оказывает большое влияние на хозяйственную деятельность человека.

Ключевые слова: Малко-Петропавловская зона, «слабые» зоны, трещиноватость, гидротермально-магматическая активность.

DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2023.2-5>

Цитирование: 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. <https://doi.org/10.21455/GPB2023.2-5>

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время существуют разные методы анализа цифровых моделей рельефа (ЦМР), включающие ручное и автоматизированное дешифрирование линеаментов и расчет различных морфометрических характеристик. Результаты анализа позволяют сформировать представление о мегатрещиноватости, выделить предполагаемые геодинамически активные зоны, области тектонической раздробленности. Однако в ряде регионов, прежде всего на платформенных территориях, отличающихся слабой геодинамической активностью, достаточно сложно верифицировать установленные по геоморфологическим признакам области повышенной трещиноватости.

В пределах Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций (МПЗ) Камчатского полуострова изучено множество вулканических образований (от

крупных стратовулканов до небольших моногенных конусов) (рис. 1) и выходов термальных вод, служащих непосредственными индикаторами повышенной гидротермально-флюидной проницаемости верхней части литосферы. Эта особенность дает возможность на количественном уровне сопоставлять характеризующие трещиноватость геоморфологические параметры с данными о расположении вулканических построек и горячих источников.

По нашему мнению, такая количественная оценка представляет определенный интерес, поскольку определяет степень информативности разных морфометрических параметров для понимания характера и степени нарушенности верхней части литосферы. По этой причине в настоящей статье данной задаче уделено особое внимание. Кроме того, выбранный методический подход позволяет оценить значимость выраженной в

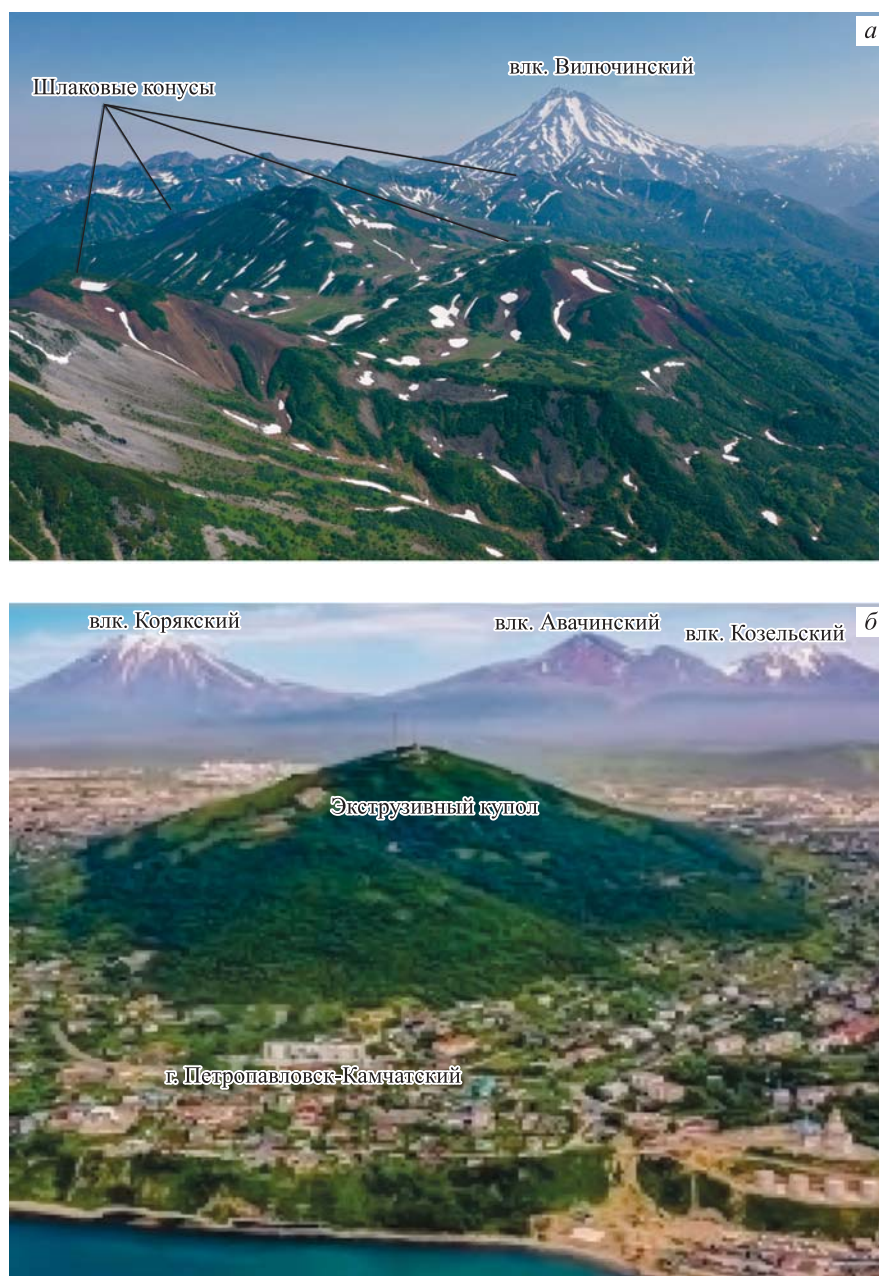


Рис. 1. Разнообразие проявлений вулканизма в Малко-Петропавловской зоне

а. Шлаковые конусы в долине р. Паратунка и стратовулкан Вилучинский. Фото А.Н. Рогозина.

б. Экструзивный купол сопки Мишенная в центре г. Петропавловск-Камчатский; на заднем плане – стратовулканы Корякский, Авачинский, Козельский

рельефе трещиноватости как одного из факторов, обуславливающих современную гидротермально-магматическую деятельность региона.

Практическая значимость подобного рода исследований связана также с тем, что в МПЗ проживает 78 % (~240 тыс. чел. на конец 2022 г.) населения Камчатки (URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781>), здесь расположена база Тихоокеанского флота, морской порт, аэропорт. Выявление генерирующей роли трещиноватости земной коры в проявлениях гидротермально-магматических систем и вулканизма определяет высокую актуальность работы для хозяйственной деятельности человека.

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТЕРРИТОРИИ

Малко-Петропавловская зона, расположенная на юго-восточном побережье п-ова Камчатка, простирается в северо-западном направлении от Авачинского залива до р. Быстрая (Малкинская). Она ограничена региональными разрывными нарушениями – Петропавловским и Вилучинским разломами северо-западного простирания – и субмеридиональным разломом, ориентированным вдоль р. Быстрая [Гонтовая и др., 2008].

Формирование МПЗ связано с историей развития Тихоокеанской плиты и северо-западного обрамления

Пацифики и, в частности, с аккрецией Кронцкой палеодуги к континентальной окраине Камчатки [Селиверстов, 1998; Авдейко, Бергаль-Кувикас, 2015]. Вариации геофизических параметров слэба вдоль дуги подтверждают аномальность зоны [Гордеев, Бергаль-Кувикас, 2022]. По данным сейсмической томографии, в изучаемом районе фиксируются многочисленные разрывные нарушения [Bushenkova et al., 2023]. Обогащение магм моногенных шлаковых конусов флюид-неомобильными элементами и отличительные изотопные метки позволили предположить усложненную обстановку формирования вулканизма МПЗ [Bergal-Kuvikas et al., 2022].

Исследуемый район отличается сложным рельефом и геологическим строением. В геоморфологическом отношении МПЗ находится на территории пяти орографических районов: Восточного приморского, Восточного вулканического, Восточного хребта, Центрально-Камчатской равнины и Срединного хребта. К основным формам рельефа прибрежной части МПЗ относятся стратовулканы – Корякский (3456 м), Авачинский (2741 м) и Вилючинский (2173 м), возвышающиеся над нагорьями-плато, прорезанными широкими долинами рек – Паратунки и Авачи. Правая и Средняя Авача берут начало в области Ганальского хребта север–северо-восточного простирания, наивысшей точкой которого является влк. Бакенинг (2276 м). Южнее Ганальского хребта развит среднегорный рельеф – хребты Балаганчик, Хребтик, Карымшина, Быстринский, Халзан и др., в то время как р. Быстрая протекает параллельно Ганальскому хребту по достаточно узкой в данном районе Центральной Камчатской равнине; ее западной границей служит Срединный хребет, достигающий в районе работ высоты 1674 м (гора Лунтос) [Ресурсы..., 1973].

В геологическом отношении изучаемая область находится в пределах двух структур 1-го порядка – Восточно-Камчатского прогиба и Камчатско-Корякского антиклинория [Мороз и др., 2008], на которые наложены вулканические пояса – Восточно- и Южно-Камчатский. Наиболее древними породами являются метаморфические образования домезозойского комплекса основания, наряду с интрузивными телами эоцен–плиоценового возраста участвующие в строении Ганальского горста (структура 2-го порядка). Более поздние верхнемеловые–эоценовые терригенно-кремнисто-вулканогенные образования наблюдаются южнее с. Малки и на побережье Авачинского залива, где расположен Прибрежный горст, также являющийся региональной структурой 2-го порядка.

На большей части территории развиты эоцен–верхнемиоценовые осадочные и вулканогенно-осадочные образования, а в районе Корякской и Авачинской сопок преобладают плиоцен–четвертичные, в том числе туфогенно-осадочные отложения. Структурный план района осложнен многочисленными разрывными нарушениями, эоцен–четвертичными интрузивными телами, а также дуговыми вулкано-тектоническими структурами – Карымшинской, Бакенинской и Китхойской [Государственная..., 2006], к которым приурочены палеокальдеры Карымшина [Леонов, Rogozin, 2007] и Верхнеавачинская [Bergal-Kuvikas et al., 2019].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных данных нами использована цифровая модель рельефа STRM разрешением 1 угл. с (~30 м) (URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl-lnv003>), геологические карты масштаба 1 : 200 000, на которых показано расположение вулканических построек, даек и жил [Государственная..., 2000а, б, 2013, 2016], и геологическая карта масштаба 1 : 1 000 000 (Л. N-57), послужившая источником информации о конфигурации региональных разрывных нарушений [Государственная..., 2006]. Схемы гидросети и расположения горячих источников составлены по топографическим картам масштаба 1 : 100 000, размещенным в открытом доступе (URL: http://www.etomesto.ru/margenshtab_n-57). Расположение скважин Кеткинского месторождения термальных вод приведено по [Таран и др., 2021].

Для того чтобы охарактеризовать выраженную в рельефе трещиноватость, нами выполнено структурно-геоморфологическое дешифрирование ЦМР по методике Н.П. Костенко [1999], предполагающей выделение «слабых» зон. Они представляют собой зоны разрывов, повышенной трещиноватости, дробления пород. В ряде работ (см., например, [Панина, 2019]) термины «слабые» зоны и линеаменты упомянуты как синонимы. Нами под линеаментами понимаются линейные элементы рельефа нетехногенного характера, что соответствует трактовке данного термина Ю.В. Нечаевым [2010], использовавшим удельную длину линеаментов (УДЛ) в качестве показателя степени тектонической раздробленности литосферы.

В методическом отношении «слабые» зоны выделены по спрямленным участкам эрозионной сети и служат границами блоков, а на схемах линеаментов, составленных Ю.В. Нечаевым [2010], последние нередко соответствуют водоразделам и не всегда формируют упорядоченную блоковую морфоструктуру. С учетом длин «слабых» зон нами составлена роза-диаграмма их простираний, сопоставленная с аналогичными розами-диаграммами простирания региональных разрывных нарушений, а также даек и жил. Расчет средних круговых значений азимутов простирания выполнен по формулам, приведенным в монографии [Каждан, Гуськов, 1980].

Согласно выводам работы [Нечаев, 2010], тектоническая раздробленность верхней части литосферы может оцениваться по УДЛ. Поскольку алгоритм выделения линеаментов Ю.В. Нечаевым в достаточной мере формализован не был, для решения этой задачи нами составлены схемы удельной длины «слабых» зон, рассчитанные как $\Sigma L/a^2$, где ΣL – суммарная протяженность этих зон (км) в расчетной ячейке площадью a^2 (км²). С учетом размеров района работ для a выбраны значения 5, 10, 15 и 20 км.

Используемый методический подход предполагает, что степень тектонической раздробленности оценивается для глубин $H = a/2$. Таким образом, нами составлена 3D-модель, характеризующая этот параметр в интервале глубин 2.5–10 км. Она сопоставлена с аналогичной моделью, для которой вместо удельной длины «слабых» зон использована удельная длина водотоков,

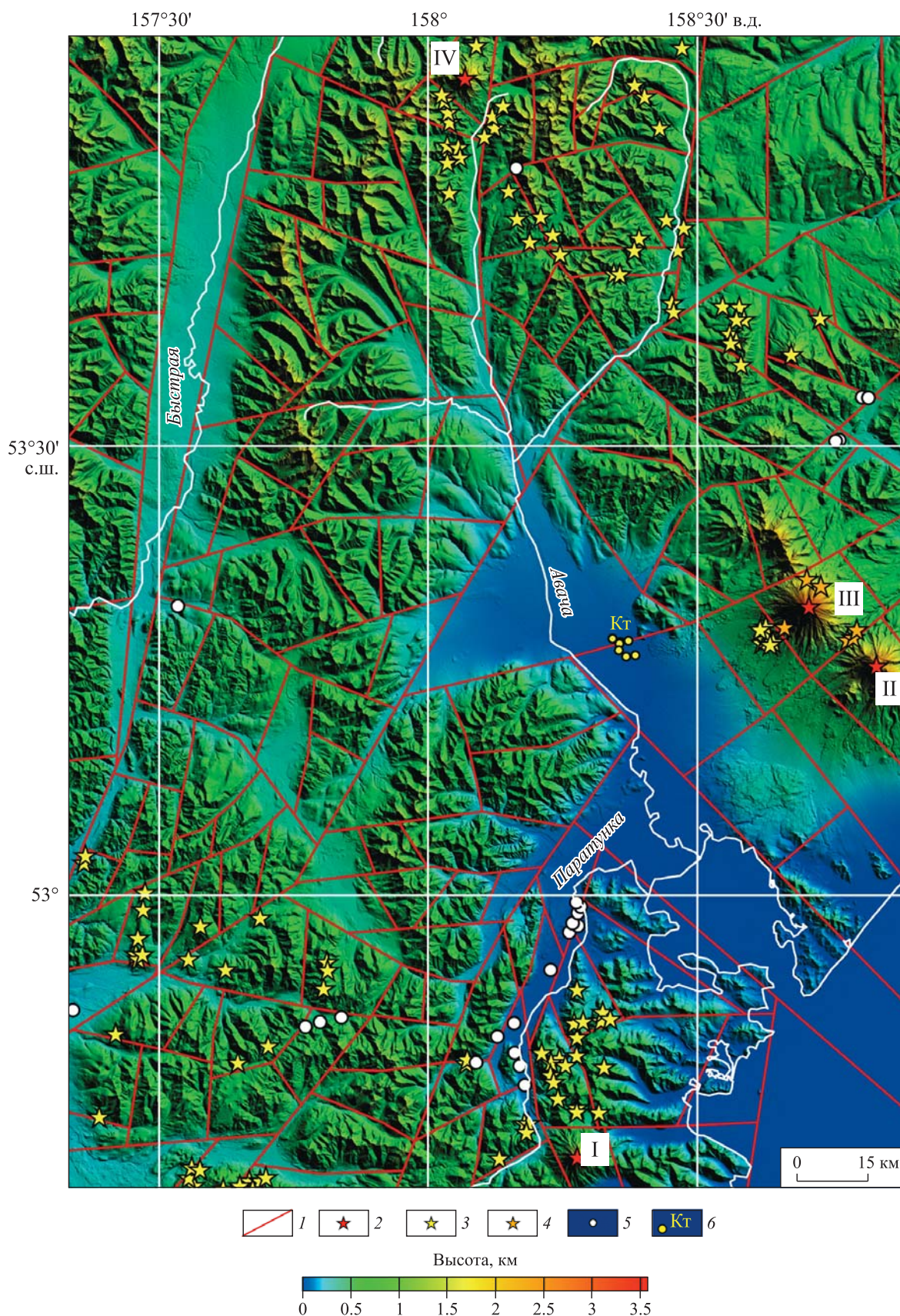


Рис. 2. Схема «слабых» зон района МПЗ

1 – границы «слабых» зон; 2 – стратовулканы: I – Вилочинский, II – Авачинский, III – Коряжский, IV – Бакенинг; 3 – моногенные шлаковые и лавовые конусы; 4 – побочные конусы, расположенные на склонах стратовулканов; 5 – горячие источники; 6 – скважины Кеткинского месторождения термальных вод

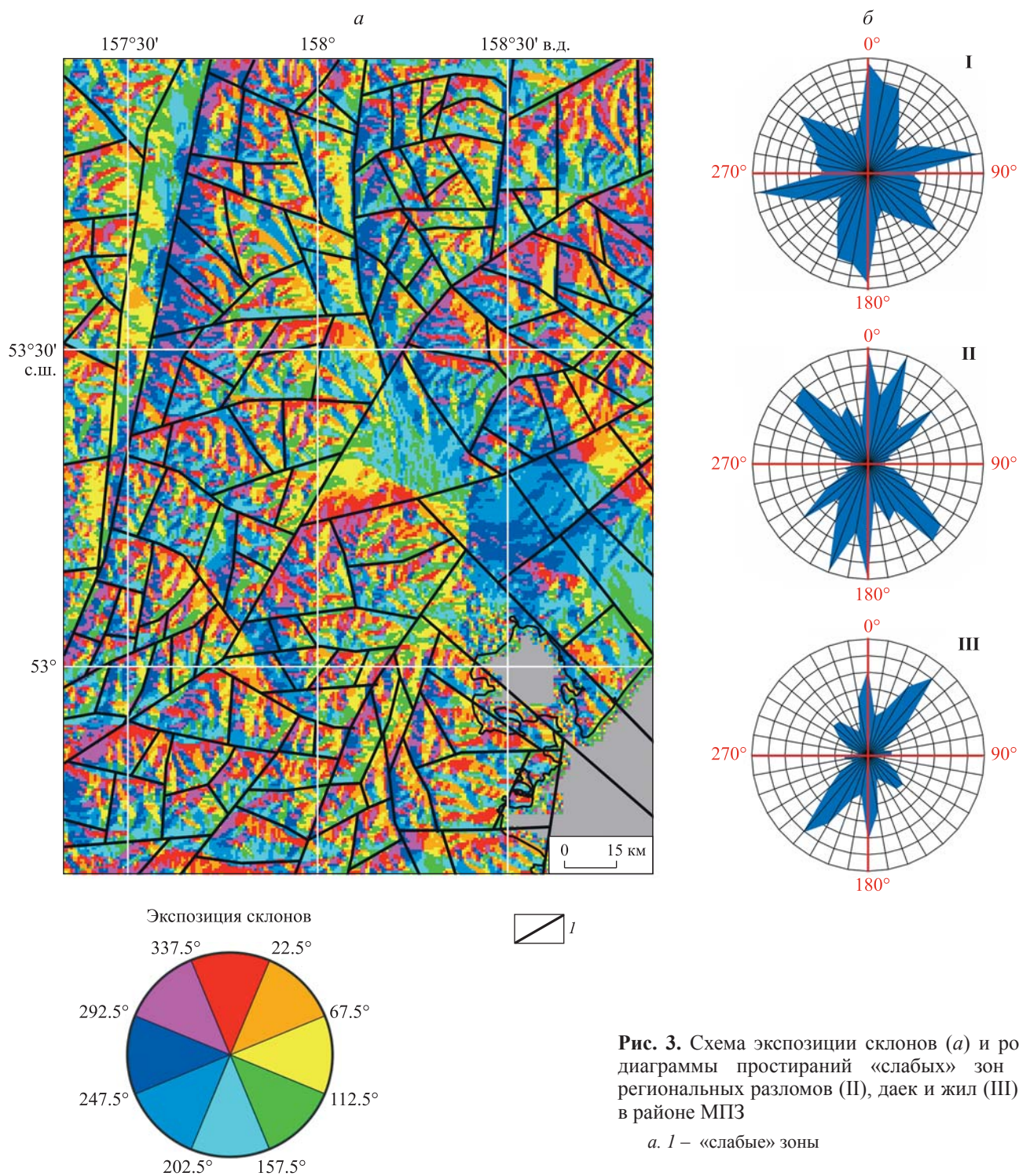


Рис. 3. Схема экспозиции склонов (а) и розы-диаграммы простираний «слабых» зон (I), региональных разломов (II), даек и жил (III) в районе МПЗ

а. I – «слабые» зоны

служащая мерой горизонтального расчленения рельефа [Симонов, 1999].

Сравнение конфигурации «слабых» зон со схемой экспозиции склонов, построенной в среде ArcGis, показало, что линейные элементы дешифрирования хорошо выражены на ней как прямолинейные участки, разделяющие разнонаправленные склоны. Отметим, что водоразделы проявлены на схеме хуже, чем «слабые» зоны; видимо, это связано с высокой степенью расчлененности хребтов эрозионной сетью. Такая особенность позволила использовать среднеквадратичное отклонение экспозиции склонов, рассчитанное в ячейках размером

10×10 км, в качестве одного из морфометрических параметров, характеризующих трещиноватость.

Известно, что в ряде случаев области пересечения линейментов отличаются аномальной тектонической раздробленностью, геодинамической подвижностью, газо- и флюидопроницаемостью [Полемаев, 2015], поэтому пересечения «слабых» зон были отмечены точками и составлена схема плотности точек. Этот методический прием применен также для мест слияния водотоков. Для расчета коэффициента корреляции между значениями плотности «узлов» – мест слияния водотоков и пересечения «слабых» зон – соответствующие

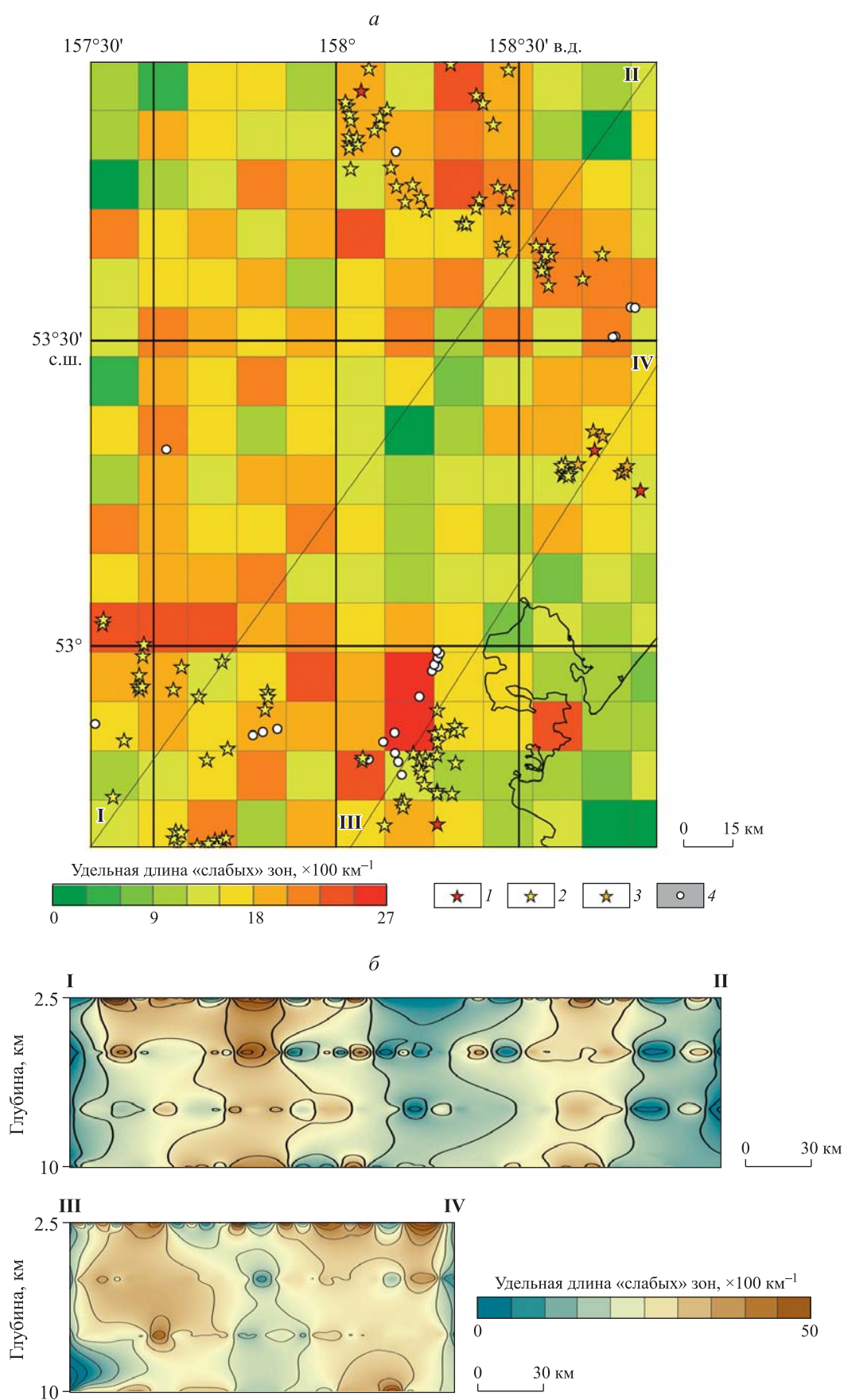


Рис. 4. Схема удельной длины «слабых» зон МПЗ в плане (а) и по профилям I–II и III–IV (б)

а. 1 – стратовулканы; 2 – моногенные шлаковые и лавовые конусы; 3 – побочные конусы, расположенные на склонах стратовулканов; 4 – горячие источники. Модель 1 – воксельная модель, характеризующая трещиноватость. Построена на основе разномасштабных схем удельной длины «слабых» зон (пояснения см. в тексте)

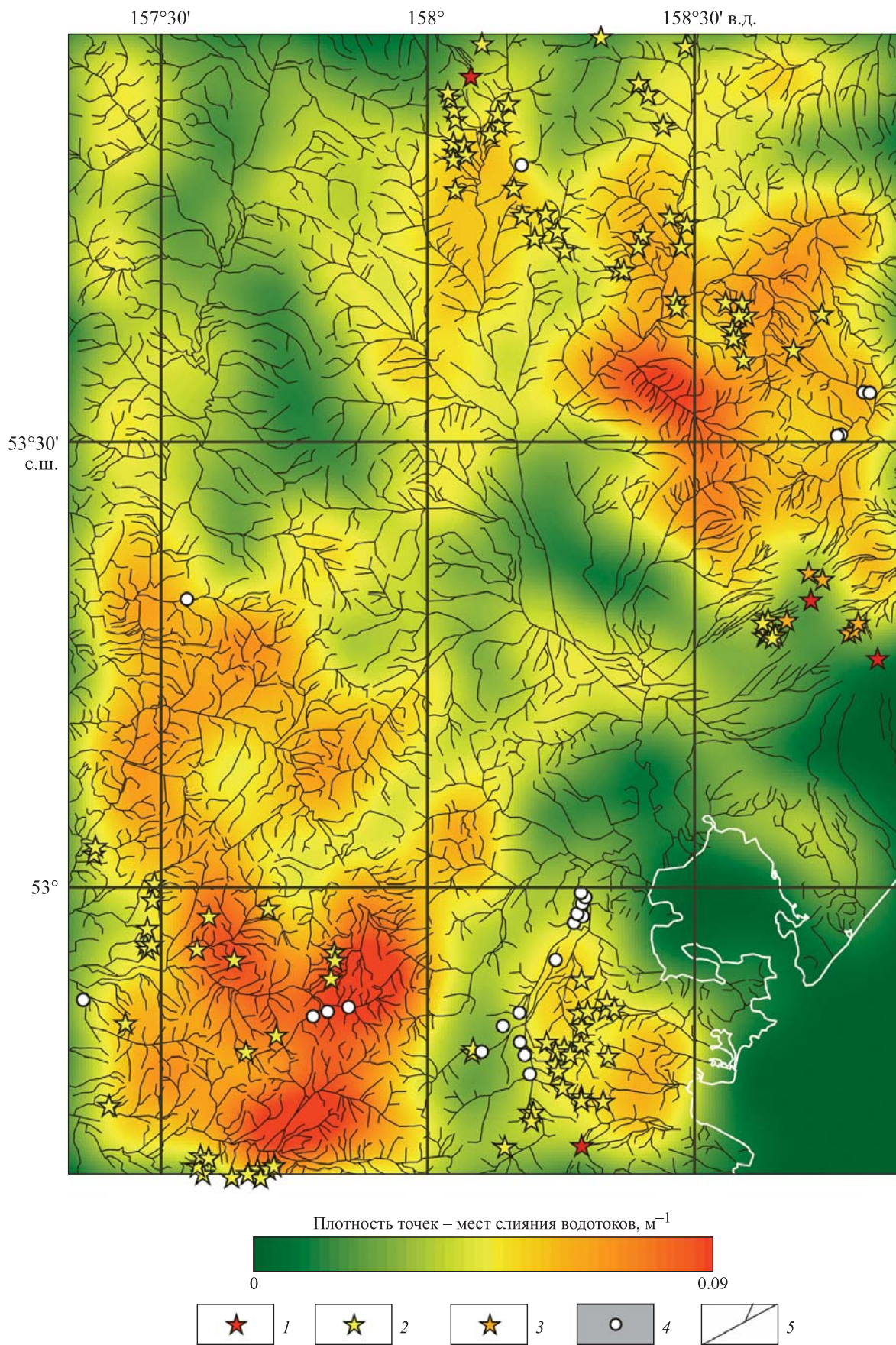


Рис. 5. Схема плотности точек, которыми отмечены места слияния водотоков в районе МПЗ

1 – стратовулканы; 2 – моногенные шлаковые и лавовые конусы; 3 – побочные конусы, расположенные на склонах стратовулканов; 4 – горячие источники; 5 – водотоки

схемы были представлены как множество равноудаленных точек в среде ArcGis.

Схемы удельных длин «слабых» зон и водотоков, дисперсии экспозиции склонов, плотности точек в местах пересечения «слабых» зон и слияния водотоков на количественном уровне сопоставлены с пространственным распределением вулканических построек и термальных источников. Для этого рассчитаны медианные значения выбранных морфометрических характеристик и их 95 %-ные доверительные интервалы с использованием программы Довинт, алгоритм которой описан в статье [Наркевич и др., 2013]. Полученные значения сравнивались с медианными, определенными в точках, соответствующих вулканическим постройкам и выходам термальных вод. Отметим, что стратовулканы (Авачинский, Корякский, Вилючинский и Бакенинг) и расположенные на их склонах побочные конусы исключены из рассмотрения, поскольку для соответствующих участков затруднительно выделить формы рельефа предположительно тектонического, а не вулканического происхождения.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что «слабые» зоны, которым соответствуют предполагаемые области повышенной гидротермально-флюидной проницаемости, простираются на исследуемой территории в трех основных направлениях по азимутам 0–20, 80 и 130°; среднее круговое значение составляет 76°. Схожие направления (0, 20, 50, 130–140°, среднее круговое – 75°) показаны на розе-диаграмме простираций региональных разломов (рис. 2, 3). Отметим, что субмеридиональное и северо-западное направления соответствуют ориентировкам наиболее выраженных в рельефе крупных разломов, ограничивающих МПЗ, а в северо-восточных румбах преимущественно простираются разломы и «слабые» зоны меньшей протяженности.

Определенное сходство прослеживается между упомянутыми двумя розами-диаграммами (см. рис. 2, 3) и розой-диаграммой простираций даек и жил. При этом все горячие источники и скважины Кеткинского месторождения термальных вод приурочены к «слабым» зонам; вдоль них также вытянуты отдельные цепочки шлаковых и лавовых конусов (см. рис. 2).

Максимумы удельной длины «слабых» зон приурочены к северо-восточной и юго-западной частям района, где находится большинство вулканических построек и горячих источников (рис. 4). Аналогичное распределение максимумов наблюдается также на схемах удельной длины водотоков и плотности точек – мест пересечения «слабых» зон и слияния водотоков (рис. 5) – и среднеквадратичного отклонения экспозиции склонов.

В таблице и на рис. 6 сопоставлены упомянутые морфометрические характеристики и проявления гидротермально-магматической активности. Отметим, что во всех случаях доверительные интервалы медиан либо не пересекаются, либо пересекаются незначительно; этот факт указывает на статистическую значимость выявленной взаимосвязи.

Установлено сходство 3D-моделей, характеризующих степень тектонической раздробленности и построенных по разным параметрам – удельным длинам «слабых» зон и удельным длинам водотоков: коэффициент корреляции Пирсона (K_{Π}) между их точечными элементами составляет 0.86 (при $N = 2388$). На двух вертикальных срезах модели 1 (см. рис. 4) выражены две положительные аномалии удельной длины «слабых» зон, расположенные в юго-западной и северо-восточной частях региона исследований. Они интерпретируются как предполагаемые области повышенной тектонической раздробленности и разделены локальным минимумом, приуроченным к Авачинской депрессии, где отсутствуют моногенные шлаковые и лавовые конусы.

Об определенном сходстве распределения значений дисперсии экспозиции склонов и удельной длины

Сопоставление медианных значений морфометрических параметров рельефа, рассчитанных для всей территории изучаемого района, и точечных объектов – вулканических построек ($n = 106$) и горячих источников ($n = 23$)

Параметр	Район исследования в целом			Вулканические постройки			Горячие источники		
	М	L	U	М	L	U	М	L	U
1	13.0	12.1	14.5	16.1	14.3	16.8	16.1	15.0	19.1
2	95.4°	92.8°	97.5°	102.4°	96.7°	108.6°	102.1°	97.6°	112.1°
3	46.9	44.9	48.5	50.8	47.5	53.1	62.3	56.6	63.5
4	3.57	3.56	3.58	4.23	4.05	4.48	3.54	3.21	4.97
5	6.18	6.16	6.21	8.07	7.67	8.64	10.55	9.18	11.12

Примечания. Параметры: 1 – удельная длина «слабых» зон в расчетных ячейках 15×15 км, ×100 км⁻¹; 2 – среднеквадратичное отклонение экспозиции склонов в расчетных ячейках 10×10 км; 3 – удельная длина водотоков в расчетных ячейках 10×10 км, ×100 км⁻¹; 4 – плотность точек, поставленных в местах слияния рек, ×100 м⁻¹; 5 – плотность точек, поставленных в местах пересечения «слабых» зон, ×100 м⁻¹. М – медиана, L и U – соответственно нижняя и верхняя границы 95 %-ного доверительного интервала медианы.

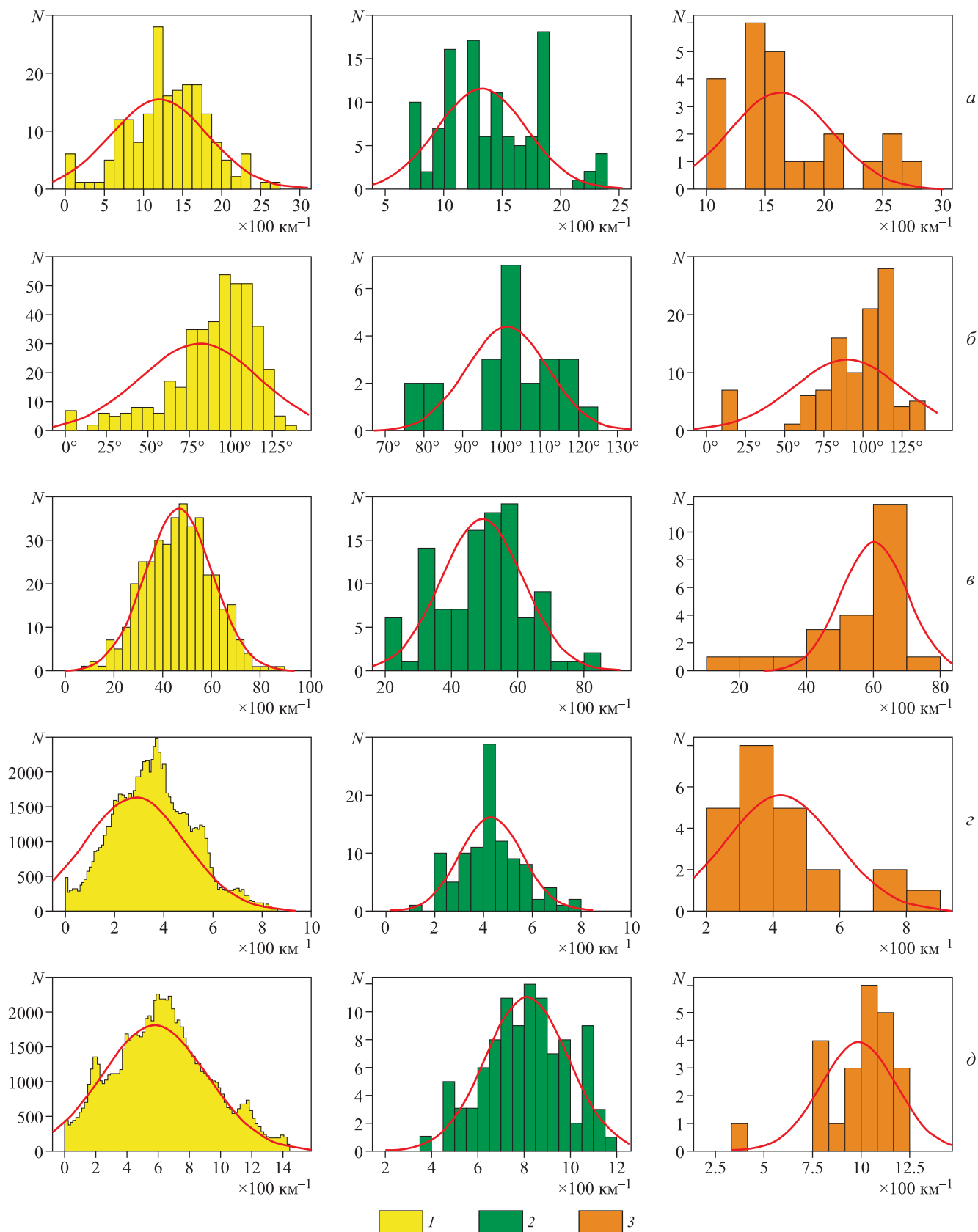


Рис. 6. Гистограммы частот (N) морфометрических параметров рельефа, рассчитанных для всей изучаемой территории и для точечных объектов (см. таблицу)

a – удельная длина «слабых» зон в расчетных ячейках 15×15 км; $б$ – среднеквадратичное отклонение экспозиции склонов в расчетных ячейках 10×10 км; $в$ – удельная длина водотоков в расчетных ячейках 10×10 км; $г$ – плотность точек, поставленных в местах слияния рек; $д$ – плотность точек, поставленных в местах пересечения «слабых» зон.

1 – для всего района исследований; 2 – для вулканов; 3 – для горячих источников

«слабых» зон по площади свидетельствует численная корреляция между этими параметрами, рассчитанными в ячейках размерами 20×20 км: $K_{\Pi} = 0.28$ при $N = 108$. Умеренная (по шкале Чеддока) корреляция существует между дисперсией экспозиции склонов и удельной длиной водотоков, определенной для тех же расчетных ячеек; коэффициент корреляции составляет 0.37. Отмеченные выше общие закономерности распределения максимумов плотности точек – мест слияния водотоков – и пересечения линеаментов также подтверждаются умеренной численной корреляцией между двумя этими параметрами ($K_{\Pi} = 0.49$ при $N = 82\ 011$).

ВЫВОДЫ

1. По комплексу геоморфологических признаков выделены две области повышенной трещиноватости, расположенные в юго-западной и северо-восточных частях изучаемого района. Они отличаются повышенными значениями удельной длины «слабых» зон и водотоков, среднеквадратичного отклонения экспозиции склонов, а также плотности точек – «узлов» пересечения «слабых» зон и мест слияния водотоков.

2. Установлена приуроченность положительных аномалий перечисленных морфометрических параметров к областям развития моногенных вулканических построек и выходам на поверхность термальных вод. Этот факт указывает на взаимосвязь трещиноватости и современной гидротермально-магматической активности.

3. На примере изучаемого региона обоснована возможность построения 3D-модели, характеризующей тектоническую раздробленность, по данным об удельной протяженности водотоков. По нашему мнению, это дополнение к методике Ю.В. Нечаева [2010] значимо, поскольку визуальное дешифрирование во многом субъективно.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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.
- Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В., Апрельков С.Е. Верхняя мантия Камчатки: Глубинная модель и связь с тектоникой // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 2. С. 80–91.
- Гордеев Е.И., Бергаль-Кувикас О.В. Строение и вулканизм зоны субдукции на Камчатке // Докл. Акад. наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502, № 2. С. 72–76.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Сер. Южно-Камчатская. Л. N-57-XXVII. СПб: ВСЕГЕИ, 2000а.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Сер. Южно-Камчатская. Л. N-57-XXI. СПб: ВСЕГЕИ, 2000б.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Третье поколение. Сер. Корякско-Курильская. Л. N-57. СПб: ВСЕГЕИ, 2006.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. 2-е. Сер. Хангарская. Л. N-57-XVI. СПб: ВСЕГЕИ, 2013.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. 2-е. Сер. Хангарская. Л. N-57-XX. СПб: ВСЕГЕИ, 2016.
- Каждан А.Б., Гуськов О.И. Математические методы в геологии. М.: Недра, 1980. 251 с.
- Костенко Н.П. Геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1999. 398 с.
- Леонов В.Л., Rogozin A.H. Карымшина – гигантская кальдера-супервулкан на Камчатке: Границы, строение, объем пирокластики // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 14–28.
- Мороз Ю.Ф., Лагута Н.А., Мороз Т.А. Магнитотеллурическое зондирование Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 97–109.
- Наркевич А.Н., Наркевич А.А., Виноградов К.А. Интервальная оценка медианы и ее автоматизация // Мед. статистика. 2013. № 4. С. 40–48.
- Нечаев Ю.В. Линеаменты и тектоническая раздробленность: Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы / Под ред. акад. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2010. 215 с.
- Панина Л.В. Новейшие структуры и рельеф Земли. М.: Перо, 2019. 115 с.
- Полетаев А.И. «Особые» структурные формы Земли и некоторые закономерности био- и этносociотектоники // Пространство и Время. 2015. № 1–2. С. 294–301.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Т. 20. Камчатка. 366 с.
- Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Науч. мир, 1998. 164 с.
- Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 251 с.
- Таран Ю.А., Рябинин Г.В., Покровский Б.Г., Нажалова И.Н., Малик Н.А. Минеральные воды Авачинской депрессии, Камчатка // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. № 2, вып. 50. С. 22–39.
- Bergal-Kuvikas O., Leonov V., Rogozin A., Bindeman I., Kliapitskiy E., Churikova T. Stratigraphy, structure and geology of Late Miocene Verkhneavachinskaya caldera with basaltic-andesitic ignimbrites at Eastern Kamchatka // J. Geosci. 2019. V. 64. P. 229–250.
- 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 Appl. Geophys.* 2022. V. 179. P. 3989–4011.

Bushenkova N., Koulikov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E.I., Chebrov D.V., Abkadyrov I., Jakovlev A.,

Stupina T., Novgorodova A., Droznina S.Ya., Huang H. Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // *J. Volcanol. and Geotherm. Res.* 2023. V. 435. 107768.

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107768>

Сведения об авторах

АГИБАЛОВ Алексей Олегович – кандидат геолого-минералогических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Россия, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, д. 9. E-mail: agibalo@yandex.ru

БЕРГАЛЬ-КУВИКАС Ольга Валерьевна – кандидат геолого-минералогических наук, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Россия, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, д. 9. 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, Ленинские горы, д. 1. E-mail: v.zaitsev@mail.ru

МАКЕЕВ Владимир Михайлович – доктор геолого-минералогических наук, Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН. Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2. E-mail: vmakeev@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 MORPHOMETRIC PARAMETERS OF THE RELIEF THAT CHARACTERIZE FRACTURE IN THE UPPER PART OF THE LITHOSPHERE AND MANIFESTATIONS OF VOLCANISM IN THE MALKO-PETROPAVLOVSKAYA ZONE

© 2023 А.О. Agibalov^{1,2*}, О.В. Bergal-Kuvikas², В.А. Zaitsev³, В.М. Makeev⁴, А.А. Sentsov¹

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

⁴ Sergeev Institute of Geocology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: agibalo@yandex.ru

Abstract. It has been established that numerous monogenic volcanic structures and outcrops of thermal waters of the Malko-Petropavlovskaya zone of transverse dislocations (Kamchatka) are localized in areas of increased fracturing of the upper part of the earth's crust, studied by geomorphological methods. At the quantitative level, the confinement of manifestations of volcanism and hydrothermal-magmatic systems to positive anomalies in the morphometric characteristics of the relief is characterized: the specific length of «weak» zones and watercourses, the density of river and lineament crossing nodes, and the dispersion of slope exposure. A high degree of consistency between the orientations of faults and «weak» zones was revealed: both rose diagrams show northwestern, meridional, and northeastern directions, and the average circular values of their strikes are 75 and 76°, respectively. According to the method of Yu.V. Nechaev, developed 3D-models of tectonic fragmentation of the Earth's crust in the depth interval of 2.5–10 km based on the calculation of the specific lengths of «weak» zones and watercourses. The Pearson correlation coefficient between the point elements of these voxel models is 0.86. In general, the revealed relationship between morphometric characteristics and manifestations of volcanism made it possible to assume that the nature of fractures reflected in the relief is one of the main factors determining the hydrothermal-magmatic activity of the study area, which has a great impact on human economic activity.

Keywords: Malko-Petropavlovskaya zone, «weak» zones, fracturing, hydrothermal-magmatic activity.

About the authors

AGIBALOV Aleksey Olegovich – Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1; Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Russia, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piipa boul., 9. E-mail: agibalo@yandex.ru

BERGAL-KUVIKAS Olga Valerievna – Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. Russia, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piipa boul., 9. E-mail: kuvikas@mail.ru

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

MAKEEV Vladimir Mikhailovich – Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Sergeev Institute of Geoecology, Russian Academy of Sciences. Russia, 101000, Moscow, Ulansky lane, 13-2. E-mail: vmakeev@mail.ru.

SENTSOV Alexey Andreevich – Cand. Sci. (Geol. and Miner.), 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., Makeev V.M., Sentsov A.A. Relationship of morphometric parameters of the relief that characterize fracture in the upper part of the lithosphere and manifestations of volcanism in the Malko-Petropavlovskaya zone, *Geofizicheskie processy i biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2023, vol. 22, no. 2, pp. 122–133 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gpb2023.2-5>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, vol. 59, iss. 8. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>