

Работы молодых ученых

УДК 551.242

DOI: 10.31431/1816-5524-2022-1-53-104-112

АКТИВНАЯ РАЗЛОМНАЯ ТЕКТОНИКА СРЕДИННОГО ХРЕБТА, п-ов КАМЧАТКА

© 2022 Е.А. Зеленин, С.Т. Гарипова

Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: egor.zelenin@ginras.ru

Поступила в редакцию 14.01.2022; после доработки 26.02.2022; принята в печать 27.03.2022

В статье представлены результаты структурно-геоморфологического дешифрирования космических снимков для изучения активных разломов Срединного хребта Камчатки. Использование данных дистанционного зондирования Земли позволило выделить разломные уступы, а также магмопроводящие трещины, проявленные в рельефе цепочками центров извержений. Большинство выявленных разрывов расположено на вулканических плато, что косвенно свидетельствует о приуроченности разломов к области утонения хрупкого слоя земной коры под вулканическим поясом, аналогично разломам Восточного вулканического пояса. Геометрические характеристики наиболее сохранных уступов позволяют оценить магнитуду палеоземлетрясений $M_w = 5.8 \pm 0.2$, существенно превышающую историческую сейсмичность. Выявленные разрывы расположены над северным краем погруженной части Тихоокеанской плиты и протягиваются под острым углом к оси Курило-Камчатской островодужной системы. Простираение и сбросовая кинематика разломов отвечают общей для Камчатки обстановке поперечного растяжения. Полученные данные впервые обосновывают положение северной и западной границ надсубдукционных деформаций растяжения п-ова Камчатка.

Ключевые слова: Камчатка, активные разломы, дистанционные данные, структурно-геоморфологическое дешифрирование.

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Камчатка является элементом активной континентальной окраины Евразии, что определяет развитие в его пределах спектра разнообразных эндогенных процессов: от тектонических деформаций до катастрофических эксплозивных извержений. Распространение и сейсмогенерирующий потенциал активных разломов Камчатки до настоящего времени исследованы в недостаточной мере. Основной объем данных получен для наиболее активных разломов Восточно-Камчатской зоны (ВКЗР) (Kozhurin et al., 2006; Kozhurin, Zelenin, 2017) и Восточного вулканического пояса (ВВП) (Флоренский, Трифонов, 1985; Kozhurin, Zelenin, 2017), а также для области коллизии Курило-Камчатской и Алеутской дуг (Кожурин и др., 2014; Gaedicke et al., 2000) (рис. 1). Для большей части Камчатки

известны только общие схемы, которые требуют детализации (Kozhurin, 2004; Kozhurin, Zelenin, 2017). Активные разрывы в центральной и южной частях Камчатки связывают с поперечным растяжением над краем зоны субдукции, отступающей в сторону Тихоокеанской плиты (Kozhurin, Zelenin, 2017), и действительно, интенсивность деформаций затихает с удалением от Курило-Камчатского глубоководного желоба и вдоль желоба в южном направлении по мере удаления от северной границы Тихоокеанской плиты.

Сложившееся состояние изученности активных разломов Камчатки оставляет нерешенным ряд вопросов: как далеко от зоны субдукции распространяются активные разрывы? Отвечает ли кинематика наиболее удаленных разломов обстановке надсубдукционного растяжения, как показано в работе (Kozhurin, Zelenin, 2017) для более восточных зон разломов? Каков сейс-

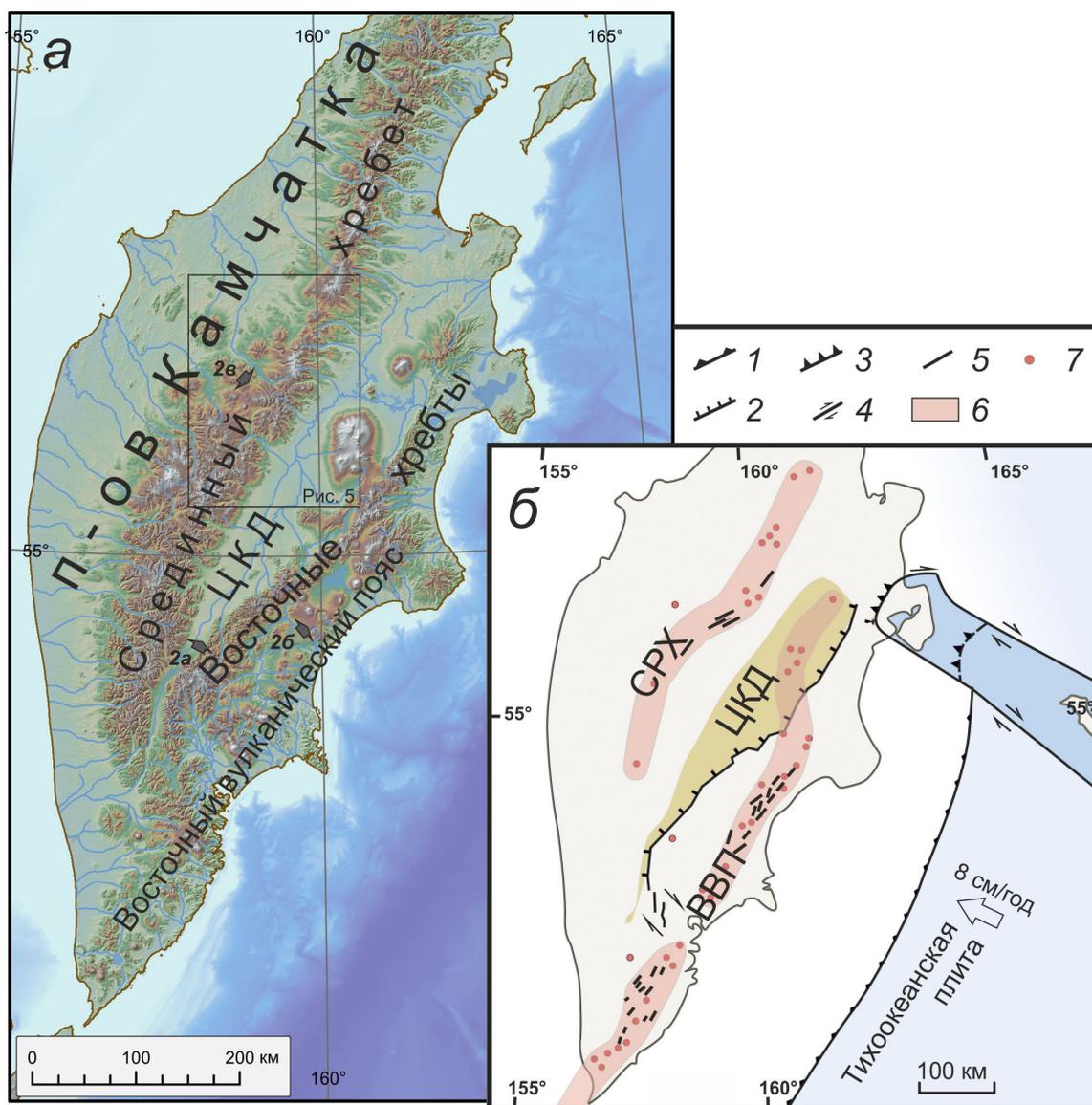


Рис. 1. Рельеф полуострова Камчатка: положение крупнейших форм рельефа на теневой отмывке цифровой модели рельефа SRTM (а); показано положение рис. 2 и 5. Структурно-геоморфологическая схема по (Zelenin et al., 2020) (б): 1 — зона субдукции; 2 — Восточно-Камчатская зона разломов, 3 — надвиги зоны коллизии дуга-дуга; 4 — сдвиги; 5 — прочие активные разломы; 6 — вулканические пояса; 7 — центры голоценовых извержений (по Базе данных голоценового вулканизма Камчатки, <http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/geoservices/hvolc.php>); СРХ — Срединный хребет, ЦКД — Центральная камчатская депрессия, ВВП — Восточный вулканический пояс.

Fig. 1. Relief of the Kamchatka Peninsula. Location of the largest landforms on the hillshaded SRTM digital elevation model (a); location of Figs. 2 and 5 is shown. Structural-geomorphological scheme (according to Zelenin et al., 2020) (b): 1— subduction zone; 2— East Kamchatka fault zone, 3— thrusts of arc-arc collision; 4— active strike-slip faults, 5— other active faults; 6— volcanic belts; 7— centers of Holocene eruptions according to the Database Holocene Volcanism of Kamchatka (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/geoservices/hvolc.php>) СРХ — Sredinny Range, ЦКД — Central Kamchatka Depression, ВВП — Eastern Volcanic Belt.

могенерирующий потенциал этих разрывов? Сейсмический эффект коровых землетрясений становится более значим на западе Камчатки из-за более слабого воздействия субдукционных землетрясений, тогда как морфологическая выраженность разломов Срединного хребта, сопоставимая с ВКРЗ и ВВП (рис. 2), позволяет ожидать здесь подвижек в ближайшем будущем.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В середине XX в. рядом исследователей (тематический выпуск *Geologische Rundschau*, 1955) были введены синонимичные термины «активный разлом» и «живой разлом» для обозначения разломов, проявляющих современные движения. В наиболее общей формулировке активным



Рис. 2. Крупнейшие зоны разломов Камчатки: Восточно-Камчатская зона разломов, сбросовая граница между Центральной Камчатской депрессией и Валагинским хребтом (трехмерный рендер космоснимка с сервиса Google Earth) (а); Восточный вулканический пояс, зона телескопированных грабенов, деформирующая игнимбритовое плато (фото А.С. Сокоренко) (б); Срединный хребет (трехмерный рендер космоснимка с сервиса Google Earth) (в). Положение разломов показано на рис. 1а.

Fig. 2. The major fault zones in Kamchatka. East Kamchatka fault zone: the normal fault boundary between the Central Kamchatka Depression and the Valaginsky Ridge (the space image render from the Google Earth service) (a); Eastern Volcanic Belt, a graben deforming an ignimbrite plateau (photo by A.S. Sokorenko) (b); Sredinny Range (the space image render from the Google Earth service) (c). The location of faults is shown in Fig. 1.

является разлом, движения по которому не только происходили, но и ожидаются в будущем (Трифонов, Кожурин, 2010 и ссылки в этой работе). Основанием для суждения такого рода является факт наличия подвижек по разлому в течение некоторого времени до настоящего момента. Период времени, необходимый и достаточный для определения активности варьирует от 10 тыс. до 1 млн лет в формулировках разных авторов (Galadini et al., 2012). Используются и более продолжительные оценки интервалов времени (например, 2.6 млн л. в (Atanaskov et al., 2021)). Общей идеей этих подходов, хоть и не высказанной явно ни в одном из определений, является то, что хотя бы одна подвижка по разлому в течение указанного времени дает основание ожидать подвижки и в ближайшем геологическом будущем. Названный временной интервал можно интерпретировать как максимальный период повторяемости подвижек по разломам (Кожурин

и др., 2008): если со времени последней подвижки прошло меньше времени, то подвижка по разлому возможна в недалеком будущем, то есть разлом активен (рис. 3). Большинство используемых интервалов существенно превышают известные периоды повторяемости, что позволяет учесть неравномерность подвижек во времени.

Основным методом в исследованиях активных разломов является структурно-геоморфологический. Выражение разлома в рельефе определяется сочетанием многих факторов, главными из которых являются генетический тип деформированной поверхности и характер движений по разрыву. Практически любой активный разлом формирует уступ земной поверхности: для сбросов и взбросов причины формирования уступа очевидны, при чистых сдвигах уступы также возникают, но за счет горизонтального смещения форм и элементов рельефа, которые никогда не бывают идеально плоскими и горизонтальными.

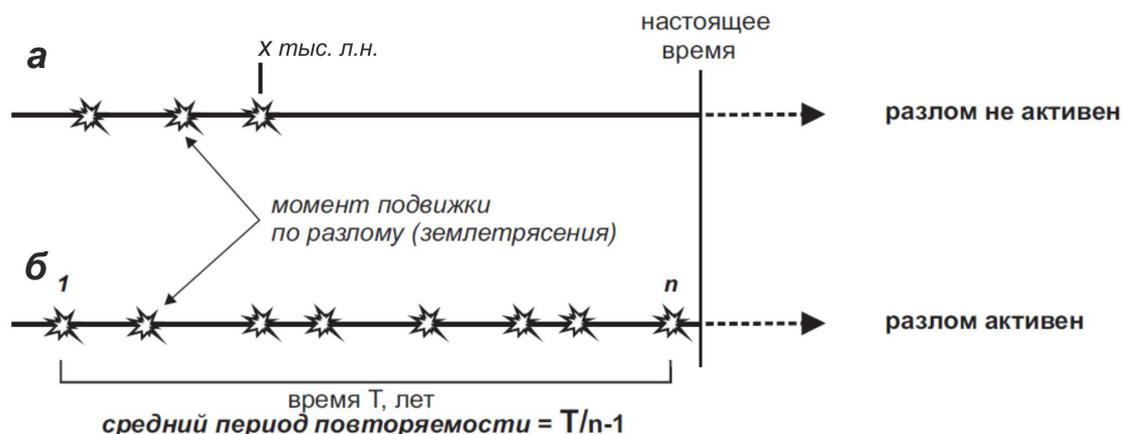


Рис. 3. Схема соотношений периода повторяемости и возраста последней подвижки по и неактивному (а) и активному (б) разломам (Кожурин и др., 2008).

Fig. 3. A recurrence period and age of the last movement at an inactive (a) and an active (b) fault (Kozhurin et al., 2008).

Конкретные особенности выраженности активных разломов в коррелятивных им формах рельефа приведены в работах (Трифонов, Кожурин, 2010; Paleoseismology, 2009).

Из геоморфологических проявлений подвижек по активным разломам вытекают основные требования к подбору данных дистанционного зондирования для изучения активных разломов — возможность измерения или, как минимум, оценки высоты разломного уступа и величины выраженного в рельефе горизонтального смещения и непрерывный пространственный охват зоны разломов съемкой однородной детальности для формирования полной картины распространения активных дизъюнктивных структур. Первое требование обуславливает необходимость привлечения цифровых моделей рельефа и стереоизображений; второе требование ограничивает применимость аэрофотоснимков, не умаляя их значимости при изучении конкретных разломов. Соответственно, в качестве базовых материалов дистанционного зондирования Земли авторы использовали свободно распространяемые снимки Landsat 8/OLI (пространственное разрешение до 15 м) и глобальные цифровые модели рельефа (ЦМР) ASTER GDEM и STRM 1 arc-second (пространственное разрешение ~30 м). Их детальность позволяет описать крупнейшие разломы и определить участки для дальнейшего детального изучения. Наилучшие же результаты при дистанционном выявлении, картографировании и изучении разломов показали аналоговые кадровые снимки проекта КН-9 Hexagon (распространяются

Геологической службой США в виде отсканированных цифровых изображений с разрешением 7 мкм/пиксель, что соответствует пространственному разрешению около 5 м в надире, <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-declassified-data-declassified-satellite-imagery-2>). Перекрытие соседних кадров достаточно для наблюдения стереоэффекта и формирования стереомоделей и ЦМР. При дальнейшем детальном изучении ключевых участков применялась свободно распространяемая цифровая модель местности ArcticDEM и полевая съемка с квадрокоптера. Для определения азимута и угла падения разломов по дистанционным данным был использован метод пластовых треугольников (рис. 4).

Маркером режима деформирования вулканических областей является расположение магмопроводящих трещин (Le Corvec et al., 2013). Как натурные наблюдения, так и физическое моделирование (Rubin, 1995) показывают, что моногенным извержениям предшествует вспарывание трещины поднимающейся дайкой по механизму гидроразрыва, причем ориентация трещины «магморазрыва» в однородной среде будет тяготеть к горизонтальной проекции оси минимального сжатия. Несмотря на то, что в пределах отдельного вулканического центра ориентировка может быть подчинена сугубо локальным условиям (Tibaldi, 1995), для полного регионального набора данных показано (Le Corvec et al., 2013) соответствие простираения цепочек шлаковых конусов, то есть питающих даек, региональному полю напряжений. Для сопоставления с простираением актив-

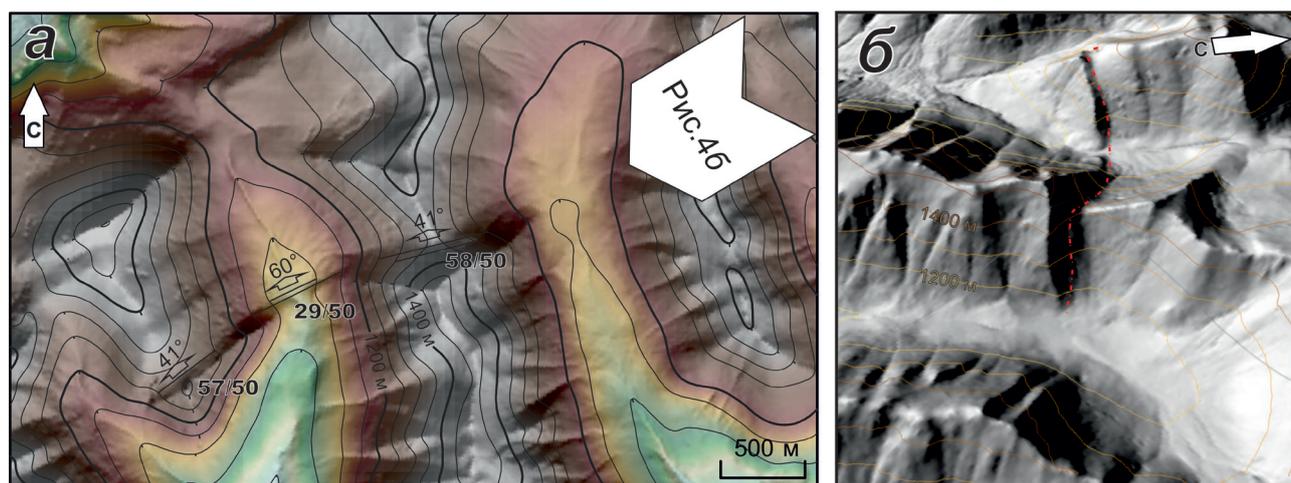


Рис. 4. Пример восстановления геометрии плоскости активного разлома по деформированному рельефу: плановый рисунок горизонталей, подписаны угол падения плоскости разлома, расстояние между линиями простираения разлома в плане (числитель) и соответствующий им перепад высоты (знаменатель) (а); трехмерная модель рельефа (вид с ССВ), разломный уступ показан красным пунктиром (б). Положение показано на рис. 5.

Fig. 4. Scheme of reconstruction of the geometry of the active fault plane from relief deformations. A map view of contours, labeled are the distance between the fault lines and the height difference (separated by “/”) and dip angle (а); oblique view of digital elevation model (view from NNE), fault scarp is shown by a dotted line (б). The position is shown in Fig. 5.

ных разломов авторами были выбраны линейные группы центров извержений, расположенные на удалении ≤ 6 км друг от друга (Сапог-Таря, 2021) на горизонтальных поверхностях с уклоном не более 10° (Tibaldi, 1995).

Магнитуда палеоземлетрясений была оценена с помощью регрессионных зависимостей, связывающих ее с протяженностью разрыва. Работы такого рода (Wells, Coppersmith, 1994; Stirling et al., 2013 и ссылки в этой работе) как правило, опираются на статистику по более

протяженным разрывам. Для сбросов длиной в единицы километров наиболее применимы соотношения, предложенные М. Леонардом (Leonard, 2010).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате структурно-геоморфологического дешифрирования была получена схема распространения активных разломов Срединного хребта (рис. 5), установлены характеристики их

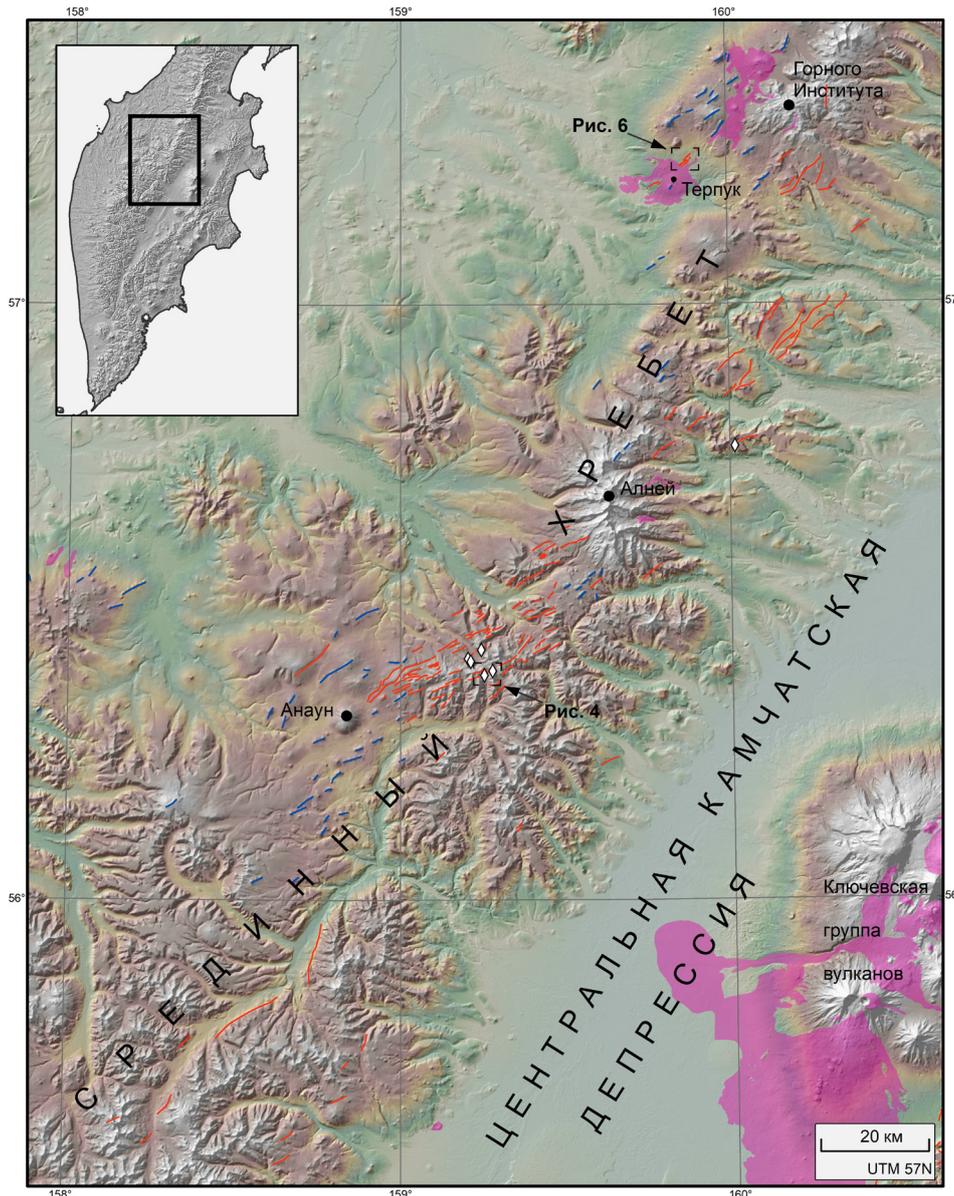


Рис. 5. Активные разломы и магмопроводящие трещины Срединного хребта (красные и синие линии, соответственно). Ромбами показано положение фотограмметрических измерений азимутов и углов падения плоскости разломов. Розовая заливка — голоценовые вулканические отложения (База данных голоценового вулканизма Камчатки, <http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/geoservices/hvolc.php>). Подписаны вулканы, упомянутые в тексте.

Fig. 5. Active faults and magma-conducting fractures of the Sredinnyy Ridge (red and blue lines, respectively). Diamonds show the position of photogrammetric measurements of strike and dip angles of fault planes. The pink fill is Holocene volcanic deposits (Holocene Volcanism Database of Kamchatka, <http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/geoservices/hvolc.php>).

кинематики и величин смещений. Активные разломы дешифрируются в широкой полосе, протягивающейся вдоль водораздела Срединного хребта от вулкана Анаун до вулкана Алней и далее на север вдоль восточного склона Срединного хребта до вулкана Горного Института. Наиболее морфологически сохранные разрывы обнаружены в области распространения голоценовых (Певзнер, 2006) лавовых потоков вулкана Терпук и, возможно, частично погребены этими потоками (рис. 6).

В целом, зона разломов простирается с ЮЗ на СВ, косо пересекая Срединный хребет по азимуту около 40° , отдельные разрывы параллельны простиранию зоны и образуют полосу деформаций шириной 40 км и длиной 250 км. Разломы распределены однородно внутри зоны, в отличие от разломов Восточного вулканического пояса, формирующих телескопированный грабен

(Флоренский, Трифонов, 1985). Фотограмметрические измерения углов падения дают значения $41\text{--}67^\circ$, поверхность висячего крыла опущена, что соответствует сбросовой кинематике подвижек, сдвиговая компонента не различима на дистанционных данных, то есть незначительна. В дополнение к активным разломам были картографированы линейные цепочки центров извержений, простирание которых было интерпретировано как простирание питающих даек.

Статистическая обработка выявленных разрывов показывает (рис. 7), что все они образуют единую группу с простиранием $40\text{--}70^\circ$ (среднее значение 55°). Аналогичные средние характеристики имеет распределение простирания питающих даек. Структуры ориентированы косо по отношению к Курило-Камчатскому глубоководному желобу, отличаясь этим как от протяженных систем разрывов восточной Кам-

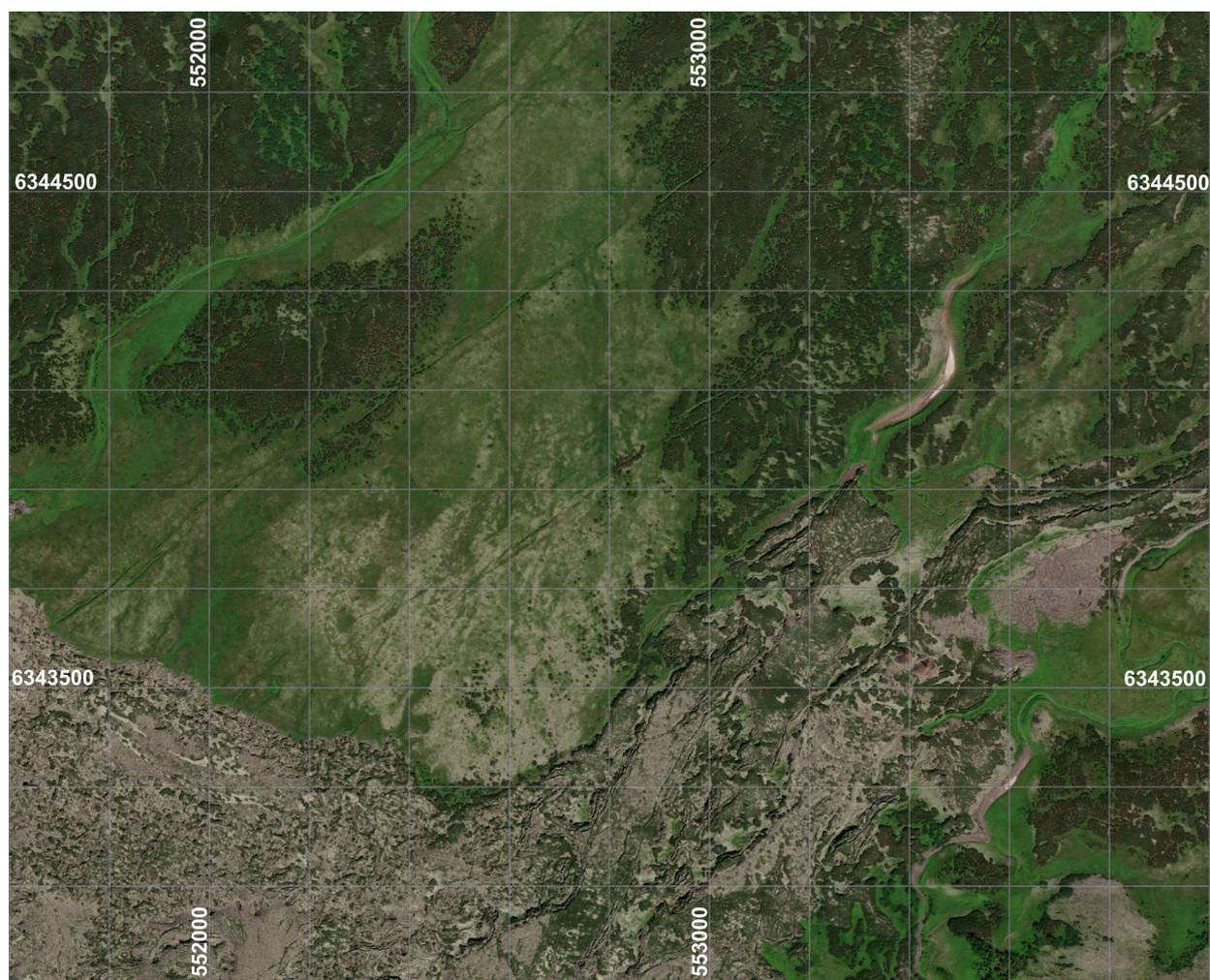


Рис. 6. Активные разломы вблизи вулкана Терпук (положение показано на рис. 5). Спутниковое изображение с сервиса ArcGIS World Imagery (<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9>), координатная сетка 57 зоны СК UTM проведена через 200 м.

Fig. 6. Active faults near Terpuik volcano (position shown in Fig. 5). Satellite image obtained from the ArcGIS World Imagery service (<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9>), coordinate system UTM zone 57, grid spacing is 200 m.

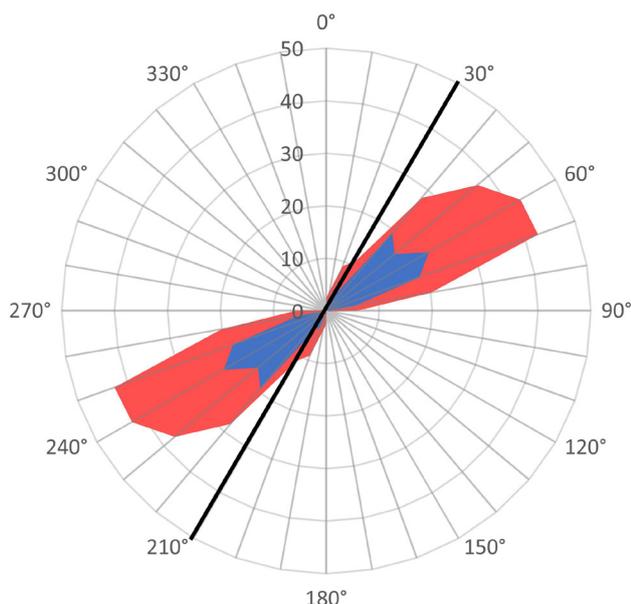


Рис. 7. Розы-диаграммы простирания разломов (красный фон) и шлаковых конусов (синий фон). Линией показано среднее простирание северной части Курило-Камчатской островодужной системы.

Fig. 7. Rose diagrams of fault strike (red fill) and magma-conducting fractures (blue fill). The line shows the average strike of the northern Kuril-Kamchatka island arc system.

чатки (Kozhurin, Zelenin, 2017), так и от разрывов южной Камчатки (Зеленин, 2017), обособленных, но, в то же время, параллельных оси островодужной системы.

Все выявленные активные разломы Срединного хребта приурочены к наиболее северному из активных сегментов Курило-Камчатской островодужной системы — от полуострова Кроноцкий до полуострова Камчатский. Простирание разломов и их сбросовая кинематика в целом соответствуют обстановке поперечного растяжения (рис. 8). Отклонение простирания разрывов от оси островодужной системы по мнению авторов может быть связано с интерференцией напряжений от зоны субдукции и зоны коллизии Алеут и Камчатки и требует дальнейшего изучения.

Большинство выявленных разрывов расположено на вулканических плато. Магматизм способствует утонению хрупкого слоя земной коры за счет подъема изотерм в вулканическом поясе: моделирование (Vugov et al., 2003) показывает, что мантийный диапир в вулканической дуге способен поднять изотерму 500°, соответствующую подошве хрупкого слоя в основных породах (Handy, 1989), до глубины порядка 5 км. Аргументом в пользу этой гипотезы является формирование крайне молодых (с неразличимым по дистанционным данным накопленным смещением) разрывов

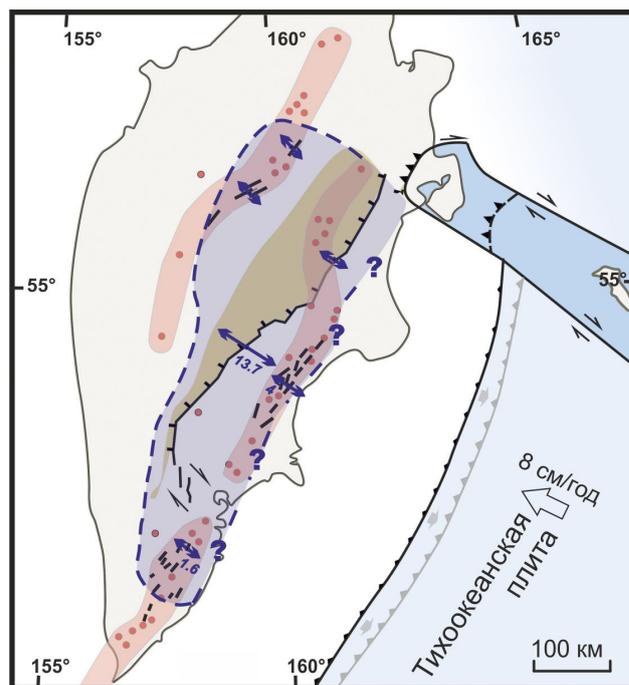


Рис. 8. Область современного растяжения (синяя заливка, оконтуренная штриховой линией), вызванного отступанием Курило-Камчатского глубоководного желоба (серая линия со стрелками) на структурно-геоморфологической схеме Камчатки (условные обозначения см. на рис. 1б). Векторы растяжения показаны стрелками, измеренные скорости растяжения подписаны в мм/год. Данные по восточной Камчатке приведены по (Kozhurin, Zelenin, 2017), по южной Камчатке — по (Зеленин, 2017).

Fig. 8. Area of modern extension (blue fill) caused by trench retreat (grey line with arrows) shown on the geomorphological map of Kamchatka (symbols are shown in Fig. 1b). Stretch vectors are shown by arrows, measured stretch rates are signed in mm/year. The data for Eastern Kamchatka are provided as in (Kozhurin, Zelenin, 2017), and for Southern Kamchatka as in (Zelenin, 2017).

близ голоценового вулкана Терпук (рис. 5, 6). Тем не менее, для подтверждения этой модели требуются дальнейшие исследования с получением статистически значимого количества датировок вулканических образований и разрывных деформаций.

Морфология разломных уступов на вулканических плато в отдельных случаях позволяет выделить изолированные разрывы и связать их с разовой подвижкой. Серия из 12 измерений изолированных разрывов к северу от вулкана Анаун позволяет оценить характерную моментную магнитуду $M_w = 5.8 \pm 0.2$, что сопоставимо с коровой сейсмичностью восточной Камчатки и существенно превышает зарегистрированную магнитуду коровых землетрясений Срединного хребта — $M_s = 4.9$ (13.12.1993, данные National Earthquake Information Center, U.S. Geological Survey, <https://earthquake.usgs.gov>).

ВЫВОДЫ

Система активных разломов Срединного хребта образована сбросами и одноактными магмоподводящими трещинами, что позволяет связать их развитие с поперечным растяжением земной коры, ранее установленным для Восточной и Южной Камчатки. Отклонение простирания разрывов от оси островодужной системы предположительно связано с интерференцией напряжений от зоны субдукции и зоны коллизии Алеут и Камчатки и требует дальнейшего изучения.

Большинство выявленных разрывов расположено на вулканических плато. Возможно, что, как и в Восточном вулканическом поясе (Kozhurin, Zelenin, 2017), разрывы и трещины в Срединном хребте развиты в области утонения хрупкого слоя земной коры под вулканическим поясом. Геометрические характеристики наиболее сохранных уступов позволяют оценить магнитуду палеоземлетрясений $M_w = 5.8 \pm 0.2$, существенно превышающую историческую сейсмичность. Полученные данные впервые обосновывают северную и западную границу надсубдукционных деформаций растяжения на Камчатке.

Авторы благодарят О.В. Дирксена и М.М. Певзнер за конструктивное обсуждение результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента РФ МК-5948.2021.1.5.

Список литературы [References]

Зеленин Е.А. Позднечетвертичные деформации Южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3. Вып. 35. С. 103–111 [*Zelenin E.A.* Late Quaternary deformations of Southern Kamchatka // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2017. № 3(35). P. 103–111 (in Russian)].

Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В. и др. Скорость коллизионных деформаций полуострова Камчатский (Камчатка) // Геотектоника. 2014. № 2. С. 42–60 [*Kozhurin, A.I., Pinegina, T.K., Ponomareva V.V. et al.* Rate of collisional deformation in Kamchatsky Peninsula, Kamchatka // *Geotectonics*. 2014. V. 48. № 2. P. 122–138. <https://doi.org/10.7868/S0016853X14020064>].

Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. Активная разломная тектоника юга Центральной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. Вып. 12. № 2. С. 10–27 [*Kozhurin, A.I., Ponomareva, V.V., Pinegina, T.K.* Active faulting in the South of Central Kamchatka // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2008. № 2(12). P. 10–27 (in Russian)].

Певзнер М.М. Голоценовый вулканизм Северной Камчатки: пространственно-временной аспект // ДАН. 2006. Т. 409. № 5. С. 648–651 [*Pevzner M.M.* Holocene volcanism of Northern Kamchatka: The spatiotemporal aspect // *Doklady of the Russian*

Academy of Sciences, Earth Sciences. 2006. V. 409A, № 6. P. 884–887].

Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Проблемы изучения активных разломов // Геотектоника. 2010. № 6. С. 79–98 [*Trifonov V.G., Kozhurin A.I.* Study of active faults: Theoretical and applied implications // *Geotectonics*. 2010. V. 44. № 6. P. 510–528].

Флоренский И.В., Трифонов В.Г. Новейшая тектоника и вулканизм Восточной вулканической зоны Камчатки // Геотектоника. 1985. № 4. С. 78–87 [*Florensky I.V., Trifonov V.G.* Neotectonics and volcanism of the East volcanic zone of Kamchatka // *Geotektonika*. 1985. 4. P. 78–87 (In Russian)].

Atanackov J., Jamsek Rupnik P., Jez J. et al. Database of active faults in Slovenia: compiling a new active fault database at the junction between the Alps, the Dinarides and the Pannonian Basin tectonic domains // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. P. 151. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.604388>

Burov E., Jaupart C., Guillou-Frottier L. Ascent and emplacement of buoyant magma bodies in brittle-ductile upper crust // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. V. 108. № B4. P. 1–20. <https://doi.org/10.1029/2002JB001904>

Canon-Tapia E. Vent distribution and sub-volcanic systems: Myths, fallacies, and some plausible facts // *Earth-Science Reviews*. 2021. V. 221. P. 103768. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103768>

Gaedicke C., Baranov B., Seliverstov N. et al. Structure of an active arc-continent collision area: the Aleutian–Kamchatka junction // *Tectonophysics*. 2000. V. 325. № 1–2. P. 63–85. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00131-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00131-1)

Geologische Rundschau. 1955. Band. 43. № 1. https://www.digizeitschriften.de/dms/toc/?PID=PPN345572157_0043

Handy M.R. Deformation regimes and the rheological evolution of fault zones in the lithosphere: the effects of pressure, temperature, grain size and time // *Tectonophysics*. 1989. V. 163. № 1–2. P. 119–152. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90122-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90122-4)

Kozhurin A.I. Active faulting at the Eurasian, North American and Pacific plates junction // *Tectonophysics*. 2004. V. 380. P. 273–285. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.024>

Kozhurin A., Acocella V., Kyle P.R. et al. Trenching studies of active faults in Kamchatka, eastern Russia: Palaeoseismic, tectonic and hazard implications // *Tectonophysics*. 2006. V. 417. P. 285–304. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.01.004>

Kozhurin A.I., Zelenin E.A. An extending island arc: The case of Kamchatka // *Tectonophysics*. 2017. Vol. 706–707. P. 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.001>

Le Corvec N., Sporli K.B., Rowland J., Lindsay J. Spatial distribution and alignments of volcanic centers: clues to the formation of monogenetic volcanic fields // *Earth-Science Reviews*. 2013. V. 124. P. 96–114. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.005>

Leonard M. Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. V. 100. № 5A. P. 1971–1988. <https://doi.org/10.1785/0120090189>

- Paleoseismology / Ed. McCalpin J.P. Academic press. 2009. 613 p.
- Rubin A.M. Propagation of magma-filled cracks // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1995. V. 23. № 1. P. 287–336. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001443>
- Schellart W.P., Freeman J., Stegman D.R. et al. Evolution and diversity of subduction zones controlled by slab width // Nature 2007. V. 446. № 7133. P. 308–311. <https://doi.org/10.1038/nature05615>
- Stirling M., Goned T., Berryman K., Litchfield N. Selection of earthquake scaling relationships for seismic-hazard analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. 2013. V. 103. № 6. P. 2993–3011. <https://doi.org/10.1785/0120130052>
- Tibaldi A. Morphology of pyroclastic cones and tectonics // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1995. V. 100. № B12. P. 24521–24535. <https://doi.org/10.1029/95JB02250>
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the seismological Society of America. 1994. V. 84. № 4. P. 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- Zelenin E.A., Kozhurin A.I., Ponomareva V.V., Portnyagin M.V. // Tephrochronological dating of paleoearthquakes in active volcanic arcs: A case of the Eastern Volcanic Front on the Kamchatka Peninsula (northwest Pacific) // Journal of Quaternary Science. 2020. V. 35. № 1–2. P. 349–361. <https://doi.org/10.1002/jqs.3145>

ACTIVE FAULTING IN SREDINNY RANGE, KAMCHATKA PENINSULA

E.A. Zelenin, S.T. Garipova

Geological Institute RAS, Moscow, Russia, 119017; e-mail: egor.zelenin@ginras.ru

Received January 14, 2022; revised February 26, 2022; accepted March 27, 2022

The paper presents the results of remote sensing interpretation of active faults of the Sredinny Range of Kamchatka. The use of remote sensing data allowed us to identify fault scarps and magma-conducting fractures, expressed in the topography by chains of eruption centers. Most of the detected faults are located on volcanic plateaus, what indicates the relation of faulting with thinning of the brittle crust under the volcanic belt, similar to the faults of the Eastern Volcanic Belt. The geometrical characteristics of the most preserved scarps provide an estimate of the magnitude of paleoearthquakes $M_w = 5.8 \pm 0.2$, which significantly exceeds the historical seismicity. The identified faults are located above the northern edge of the subducted portion of the Pacific plate and form a zone oblique to the axis of the Kuril-Kamchatka island-arc system. The strike and normal sense of the faults are consistent with the transverse extension in Kamchatka. These new data provide the northern and western boundaries of the above-subduction extensional setting in Kamchatka.

Keywords: Kamchatka, active faults, remote sensing, structural-geomorphological interpretation.