

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ СДВИГОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСТРОВЕ УРУП (БОЛЬШАЯ КУРИЛЬСКАЯ ГРЯДА)

А.А. Сенцов¹, А.О. Агибалов², В.А. Зайцев³, А.В. Полещук⁴, Е.Ю. Хрусталеv⁵

^{1,2} Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, VII отделение: Координационно-прогностический центр, лаборатория фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии (703)

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии

⁴ Геологический институт РАН, отдел тектоники, лаборатория тектоники консолидированной коры

⁵ Центральный экономико-математический институт РАН, отделение моделирования производственных объектов и комплексов, лаборатория имитационного моделирования взаимодействия экономических объектов

¹ Ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: alekssencov@yandex.ru

² Ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: agibalo@yandex.ru

³ Доц., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: v.zaitsev@mail.ru

⁴ Ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: anton302@mail.ru

⁵ Зав. лабораторией, проф., д-р экон. наук; e-mail: stalev@cemi.rssi.ru

Остров Уруп, расположенный в южной части Большой Курильской гряды, является интересным объектом исследования из-за того, что на его рельеф, отличающийся контрастностью и значительной глубиной вертикального расчленения, большое влияние оказали новейшие тектонические процессы. Судя по геологическим данным, этот остров на современном этапе находится в сдвиговом поле напряжений при ориентировке оси максимального сжатия в юго-восточных румбах. Оно объяснимо субдукционным взаимодействием Тихоокеанской и Охотоморской литосферных плит под острым углом порядка 55°. Визуальное и автоматизированное дешифрирование космических снимков и цифровой модели рельефа, анализ рисунка эрозионной сети позволили выявить геоморфологические признаки сдвиговых перемещений. К ним относится эшелонированное расположение линеаментов как трещин отрыва при правом сдвиге в районе реки Рыбной и на Сквозняковом перешейке, где ранее были выделены разрывные нарушения неуставленной кинематики. Рассмотрены закономерно ориентированные в северо-восточном направлении зоны, отличающиеся асимметричным рисунком эрозионной сети: в их пределах небольшие притоки расположены с одного борта водотока старшего порядка как мегатрещины отрыва. В районе эпицентра землетрясения 1989 г., произошедшего в обстановке широтного горизонтального растяжения, зафиксировано линейное понижение рельефа с перистым рисунком водотоков, проинтерпретированное нами как морфоструктура растяжения. Аналогичные предполагаемые зоны растяжения, простирающиеся преимущественно по азимуту 130–140°, зафиксированы на Тихоокеанском побережье острова. Ориентировка упомянутых зон, а также кинематика выделенных по геоморфологическим данным предполагаемых сдвигов согласуются с общими представлениями о напряженно-деформированном состоянии Южных Курил и выполненной нами по замерам трещиноватости реконструкции главных нормальных осей напряжений полуострова Кастрикум, что указывает на возможность предложенной структурно-геоморфологической интерпретации территории Урупа. В целом полученные нами новые данные о конфигурации и кинематике предполагаемых активных сдвиговых разрывных нарушений и морфоструктур растяжения дополняют существующие представления о новейших деформациях изучаемой области.

Ключевые слова: структурно-геоморфологический анализ, сдвиговые разрывные нарушения, Уруп, мегатрещины отрыва, линеаменты

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.7

ВВЕДЕНИЕ

Уруп – самый северный остров южной группы Большой Курильской гряды. Его площадь составляет 1430 км², длина – около 120 км, ширина – до 20 км [Полохин, 2017]. Остров вытянут в северо-восточном направлении и сложен преимущественно вулканическими породами неоген-четвертичного возраста [Ковтунович и др., 2004]. Большую

часть территории занимают вулканогенные морфоструктуры (вулканические постройки, лавовые плато), вдоль побережья фрагментарно развиты ступенчато-аккумулятивные морские равнины и террасы. Рельеф острова варьирует от низменного до среднегорного, максимальная высотная отметка – 1426 м (гора Высокая). Одной из основных геоморфологических особенностей является асимме-

трия рельефа, связанная с расположением главного водораздела ближе к Охотоморскому побережью, чем к Тихоокеанскому [Атлас..., 2009]. На острове выделены четыре хребта (Криштофовича, Петра Шмидта, Шокальского и Компанейский), разделенных понижениями (Токотанским и Сквозняковыми перешейками) [Горшков, 1958].

В геологическом отношении Уруп находится в зоне перехода между Евразийским континентом и Тихим океаном, характеризующейся высокой геодинамической активностью – сейсмичностью, вулканизмом, смещением блоков вдоль разрывных нарушений. На территории острова распространены породы рыбаковского андезитового вулканического комплекса (поздний миоцен – плиоцен), прасолов-

ского плагиогранит-диоритового плутонического комплекса (поздний миоцен – плиоцен), камуйского дацитового (плиоцен), фрегатского андезит-базальтового (плиоцен – ранний неоплейстоцен), богатырского (средний неоплейстоцен – голоцен) и роковского дацитового (поздний неоплейстоцен) вулканических комплексов [Ковтунович и др., 2004]. На территории острова насчитывают 15 вулканов [Горшков, 1954], самыми крупными из них являются горы Десантная (867 м), Антипина (1195 м), Трезубец (997 м), Колокол (1328 м), Рудакова (342 м) и Высокая (1426 м) [Атлас..., 2009]. За исторический период времени известны извержения только вулкана Берга (980 м), произошедшие в 1894–1895, 1946, 1951, 1952, 1970, 1973 и 2005 гг. (рис. 1).

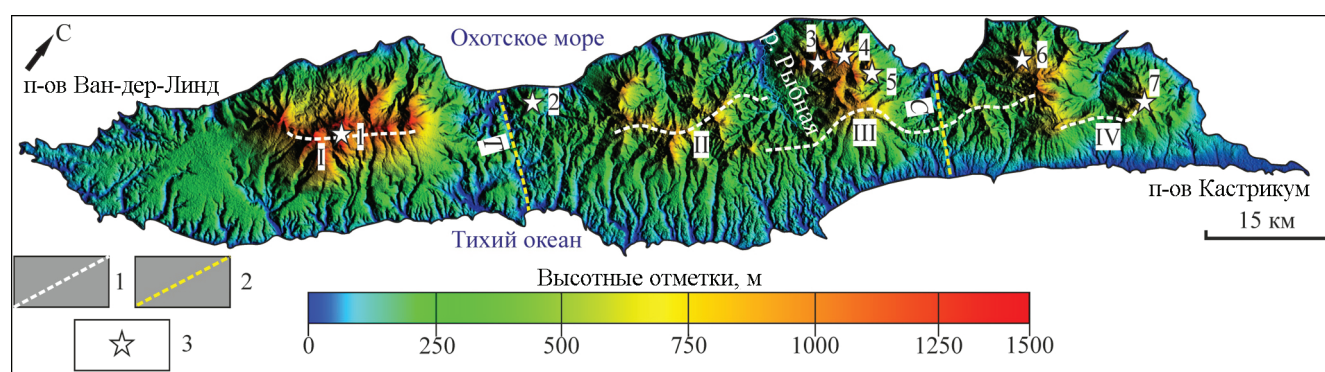


Рис. 1. Орографическая схема острова Уруп:

1 – хребты: I – Криштофовича; II – Петра Шмидта; III – Шокальского; IV – Компанейский; 2 – перешейки: T – Токотанский; C – Сквозняковый; 3 – вулканы: 1 – г. Высокая; 2 – г. Рудакова; 3 – г. Колокол; 4 – г. Трезубец; 5 – влк. Берга; 6 – г. Антипина; 7 – г. Десантная

Fig. 1. Orographic scheme of the Urup island:

1 – ridges: I – Krystofovich; II – Peter Schmidt; III – Shokalsky; IV – Companeysky; 2 – isthmuses: T – Tokotansky; C – Skvoznyakovy; 3 – volcanoes: 1 – Vysokaya; 2 – Rudakov; 3 – Kolokol; 4 – Trezubec; 5 – Berg; 6 – Antipina; 7 – Desantnaya

На острове развиты дизъюнктивные структуры двух доминирующих направлений – северо-восточного и северо-западного [Ковтунович и др., 2004]. Наиболее детально разрывные нарушения изучены на территории Айнского золото-серебряного месторождения (южная оконечность Урупа). Оно приурочено к эродированному Айнскому палеовулкану неогенового возраста, фрагментированного разломом северо-восточного простирания на две части, смещенные друг относительно друга на 3 км как при правом сдвиге [Арлюкова и др., 2018]. На этом месторождении известны также более мелкие разломы аналогичного простирания сбросовой кинематики, сформировавшиеся в раннем плиоцене, а в позднем плиоцене появилась система северо-западных сбросо-сдвигов [Филиппова, Гвоздева, 2011]. Отметим, что в масштабах всей южной части Курильских островов выделяют те же главные направления простирания сдвигов – юго-западное (азимут простирания

~160°, для левых сдвигов) и северо-восточное (азимут простирания ~60°, для правых сдвигов). По мнению [Борискина и др., 2019], активные проявления сдвиговых деформаций объяснимы тем, что Тихоокеанская плита приближается к южному сегменту Курильской островной системы под углом около 55°. Другим кинематическим индикатором сдвиговой тектоники Южных Курил является кулисообразное расположение островов под острым углом к общему направлению простирания островной дуги [Горшков, 1967], впервые упомянутое в работе [Tokuda, 1928].

Таким образом, разными исследователями установлены проявления сдвиговых перемещений регионального (для Южных Курил в целом) и локального (на острове Уруп) масштабного уровней. Задача нашего исследования заключалась в том, чтобы уточнить и дополнить эти представления с помощью современных геоморфологических методов на примере острова Уруп.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходных данных использованы цифровая модель рельефа (ЦМР) ASTER GDEM разрешением 1 угловая секунда (30 м) [Цифровая..., 2021] и космические снимки высокого разрешения, доступные для просмотра в масштабе 1 : 4 000 [Космические..., 2021]. Согласно методике Н.П. Костенко [1999] по спрямленным участкам эрозионной сети на ЦМР выделены «слабые» зоны. Этим зонам могут соответствовать активные разломы, в том числе сдвиговой кинематики, поэтому им уделено особое внимание при последующем анализе эрозионной сети структурно-геоморфологическим методом Л.А. Сим [1991]. Упомянутый метод позволяет выделить сдвиговые разрывные нарушения и определить направление смещения по ним по закономерностям ориентировок линейных элементов дешифрирования (мегатрещин), которые в ряде случаев расположены как сколы и отрывы в тектоно-физической модели М.В. Гзовского [1975]. Для того чтобы выявить такие элементы дешифрирования, нами проведен автоматизированный анализ ЦМР в программе LESSA А.А. Златопольского [2011], в результате которого получена схема линеаментов-«штрихов». Кроме того, в программе Global Mapper с помощью опции Generate watershed составлена детальная схема эрозионной сети. Розы-диаграммы, иллюстрирующие ориентировку межблоковых границ и линеаментов на ключевых участках, построены в среде ArcGis. Из-за отсутствия в этой программе стандартного модуля для создания роз-диаграмм выполнены вспомогательные вычисления, описанные в диссертации [Мануилова, 2022].

Особое внимание уделено визуальному и автоматизированному дешифрированию участка, где в 1989 г. произошло сейсмическое событие магнитудой 4,3 с известным решением фокального механизма очага, приведенного в базе данных [База..., 2022] и визуализированного в программе FaultKin Р. Алльмендингера [Allmendinger et al., 2012].

Полученные геоморфологическими методами данные о мегатрещиноватости сопоставлены с результатами обработки замеров трещин в вулканитах, полученных в ходе полевых исследований в рамках долгосрочной экспедиции «Восточный бастион – Курильская гряда 2021» (совместный проект Русского географического общества и Министерства обороны). Построена общая для всех замеров роза-диаграмма простираций трещин, а для каждой точки наблюдения элементы залегания трещин визуализированы в программе Stereonet [Cardozo, Allmendinger, 2013]. С помощью опции Bingham Axial Distribution реконструировано положение главных нормальных осей напряжений методом нахождения экстремума «функции однородности». Эта методика предполагает выполне-

ние достаточно сложных расчетов и заслуживает отдельного рассмотрения; в рамках статьи отметим, что соответствующие математические алгоритмы проанализированы в публикации [Cardozo, Allmendinger, 2013] и монографии [Ребецкий и др., 2017].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структурно-геоморфологическим методом Н.П. Костенко установлена блоковая делимость Урупа в двух главных направлениях – юго-восточном (по азимуту 120–140°) и северо-восточном (по азимуту 60–80°) (в порядке уменьшения значимости). Статистически значимы также второстепенные направления – меридиональное и север-северо-западное (азимут ~20°). Сходная закономерность характерна для ориентировок трещин, изученных в северо-восточной части острова. В целом они простираются в двух основных направлениях – юго-восточном (по азимуту 120–140°) и северо-восточном (по азимуту 60°). Как было упомянуто выше, эти два направления выражены в структурном плане всей территории Южных Курил и на южной оконечности Урупа (Айское месторождение) (рис. 2).

Анализ эрозионной сети показал, что на острове нередко встречается эшелонированное распространение небольших притоков, впадающих в более крупный водоток только с одного борта. Эти притоки ориентированы как трещины отрыва по отношению к водотоку старшего порядка. В монографии [Ребецкий и др., 2017] такой рисунок гидросети рассматривается как индикатор сдвиговых перемещений, хотя во многих случаях он объясним другими рельефообразующими процессами, например особенностями геологического строения. Однако, на наш взгляд, на территории Урупа этот рисунок связан преимущественно с тектоническими процессами по следующим соображениям: 1) в рамках модели косой субдукции теоретически обоснована возможность широкого развития сдвиговых дислокаций на Южных Курилах; 2) по геологическим данным в изучаемом районе зафиксировано большое количество разломов сдвиговой кинематики; 3) существует определенная кинематическая упорядоченность в распространении упомянутых асимметричных систем водотоков. Она заключается в преобладании (13 из 15 установленных нами случаев; см. рис. 2) ориентировок притоков как трещин отрыва при правом сдвиге; при этом практически все соответствующие водотоки старших порядков простираются по азимуту 130–140°. Как показано в статье [Борискина и др., 2019], ось сжатия на Южных Курилах ориентирована в юго-восточном направлении. В этом случае правосдвиговые перемещения по разломам, простирающимся по азимуту 130–140°, возможны (см. рис. 2, 3).

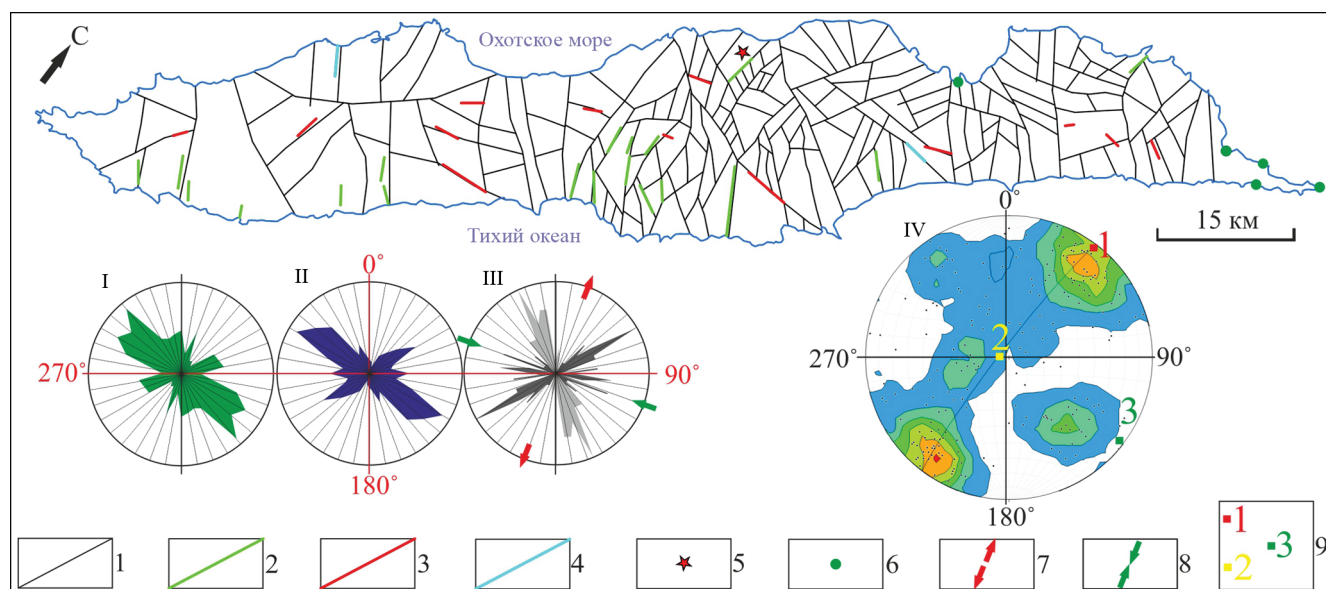


Рис. 2. Схема блоковой делимости остова Уруп, составленная по методике Н.П. Костенко:

1 – «слабые» зоны; 2 – зоны, отличающиеся перистым рисунком эрозийной сети; 3 – предполагаемые разломы правосдвиговой кинематики, выделенные по эшелонированному расположению водотоков как трещин отрыва; 4 – предполагаемые разломы левосдвиговой кинематики, выделенные по эшелонированному расположению водотоков как трещин отрыва; 5 – эпицентр землетрясения 1989 г. с известным решением фокального механизма очага; 6 – точки полевых замеров трещиноватости; 7 – ориентировка оси максимального сжатия на южном фланге Курильской островодужной системы, по [Борискина и др., 2019]; 8 – ориентировка оси максимального растяжения на южном фланге Курильской островодужной системы, по [Борискина и др., 2019]; 9 – положение главных нормальных осей напряжений на рис. 4 (1 – растяжения, 2 – промежуточной, 3 – сжатия). Розы-диаграммы простираний: I – «слабых» зон; II – трещин, изученных в пяти точках наблюдения; III – левых (светло-серые) и правых (темно-серые) сдвигов на южном фланге Курильской островодужной системы, по [Борискина и др., 2019]; IV – реконструкция положения главных нормальных осей напряжений по замерам трещиноватости на полуострове Кастрикум (нижняя полусфера)

Fig. 2. Scheme of the block divisibility of the Urup Island, compiled according to N.P. Kostenko method:

1 – “weak” zones; 2 – zones characterized by a feathery pattern of erosion network; 3 – supposed right-lateral shears, decoded by the echeloned location of watercourses as separation cracks; 4 – supposed left-lateral shears, decoded by the echeloned location of watercourses as separation cracks; 5 – epicenter of the 1989 earthquake with a known solution of the focal mechanism; 6 – points of field measurements of fracturing; 7 – orientation of the maximum compression axis on the southern flank of the Kuril island arc system, according to [Boriskina et al., 2019]; 8 – orientation of the maximum tension axis on the southern flank of the Kuril Island arc system, according to [Boriskina et al., 2019]; 9 – position of the main normal stress axes in Fig. 4 (1 – stretching; 2 – intermediate; 3 – compression). Roman numerals indicate: I – rose-diagram of the extensions of “weak” zones; II – rose-diagram of the extensions of cracks studied at 5 observation points; III – rose-diagram of the left (light gray) and right (dark gray) shear stretches on the southern flank of the Kuril Island arc system, according to [Boriskina et al., 2019]; IV – reconstruction of the position of the main normal stress axes by fracture measurements on the Kastricum Peninsula (lower hemisphere)

В связи с тем что на карте морфоструктур Курильской островодужной системы [Атлас..., 2009] в долине реки Рыбной и в районе Сквознякового перешейка показаны разрывные нарушения неуставленной кинематики, нами уделено особое внимание этим опорным участкам. С помощью программы LESSA составлены схемы линеаментов; при этом вручную проведены два наиболее протяженных линеамента, соответствующие выраженным в рельефе разломам; кроме того, небольшие (протяженностью 100–300 м) линеаменты объединены в более крупные. Из рассмотрения исключены линеаменты, расположенные на крутом юго-западном склоне горы Антипина, поскольку они, по-видимому, являются результатом гравитационных процессов. На построенных розах-диаграммах, иллюстрирующих ориентировку линеаментов, выражена общая закономерность: в

обоих случаях доминируют два направления, одно из которых соответствует ориентировке разлома, а второе отклоняется от него приблизительно на 40° по часовой стрелке. На наш взгляд, такой рисунок линеаментного поля можно интерпретировать как индикатор правосдвиговых смещений по разломам, поскольку второе доминирующее направление простирания линеаментов соответствует расположению трещин отрыва (рис. 4). Отметим, что предложенная интерпретация предполагает ориентировку оси максимального сжатия по азимуту 160° (вдоль предполагаемых мегатрещин отрыва). Отсутствие других направлений, соответствующих ориентировкам сколов в модели М.В. Гзовского [1975], по нашему мнению, не принципиально, поскольку сколовые трещины не всегда четко выражены в рельефе сдвиговых зон [Фролова и др., 2016].

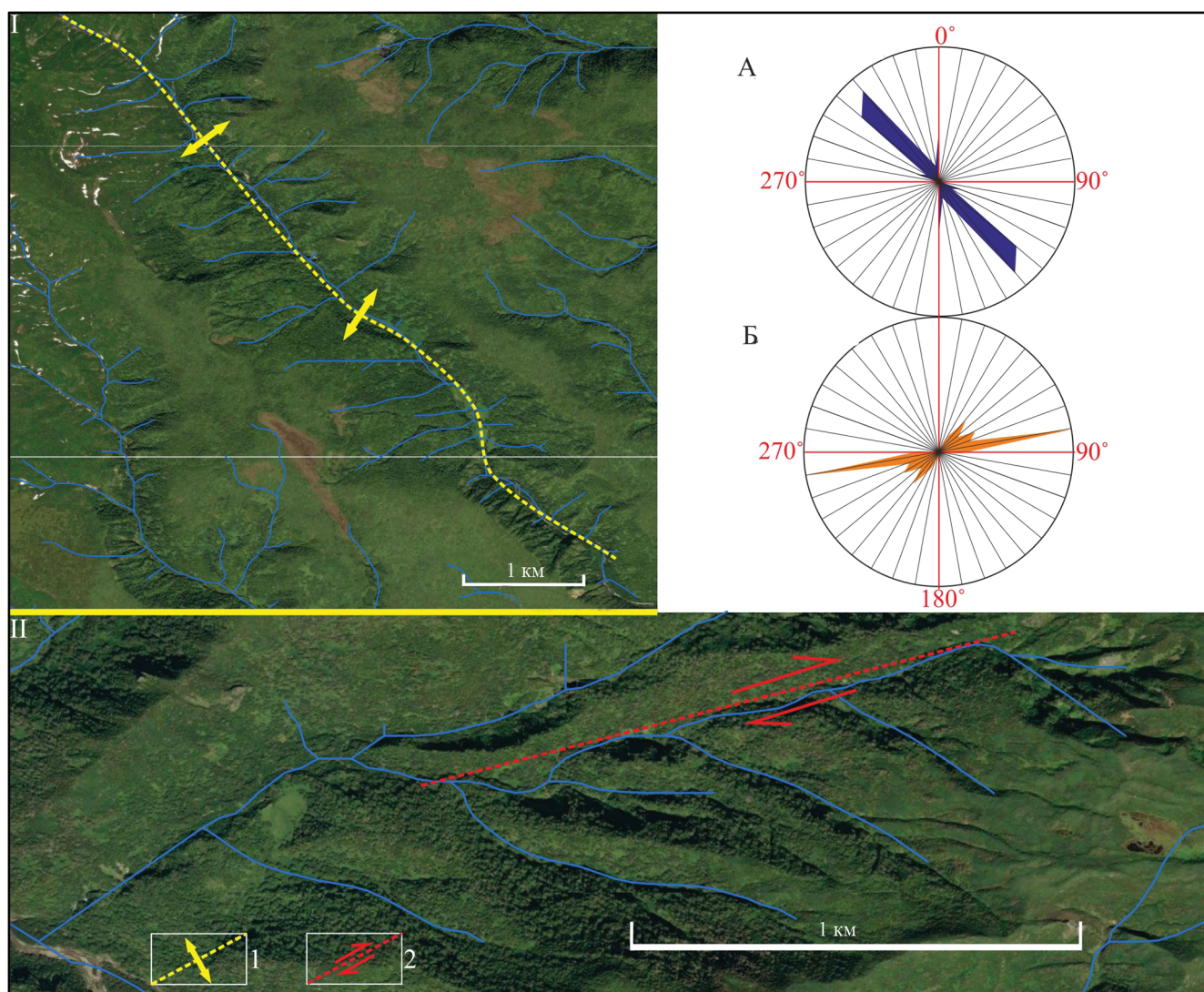


Рис. 3. Примеры выделения предполагаемых сдвигов и мегатрещин отрыва по рисунку эрозионной сети на острове Уруп:

I – дешифрирование перистого рисунка эрозионной сети; II – выделение предполагаемых разломов правосдвиговой кинематики по эшелонированному расположению небольших водотоков; розы-диаграммы простираций: А – предполагаемых морфоструктур растяжения, выделенных по перистому рисунку эрозионной сети; Б – предполагаемых правых сдвигов

Fig. 3. Examples of identification of supposed shears and megafractures according to the pattern of erosion network on the Urup Island: I – interpretation of the feathery pattern of erosion network; II – identification of the supposed right-lateral shear zones according to the echelon arrangement of small watercourses; rose diagrams of extensions: A – supposed extensional morphostructures identified by the feathery pattern of erosion network; Б – supposed right-lateral shear zones

Рассмотрение базы данных решений фокальных механизмов очагов землетрясений [База..., 2022] показало, что на территории Урупа известно только одно землетрясение с изученным фокальным механизмом. Оно произошло юго-западнее горы Колокол в обстановке субгоризонтального широтного растяжения (ось которого погружается под углом 9° по азимуту 93° , ось растяжения круто падает под углом 73° по азимуту 331°). На этом участке в рельефе хорошо выражено субмеридиональное линейное понижение, по тальвегу которого протекает водоток. Значительное количество притоков впадает в него под прямым углом.

По нашему мнению, это линейное понижение можно интерпретировать как морфоструктуру растяжения из-за его ориентировки вкост простира-ния оси максимального растяжения и перистого рисунка эрозионной сети, характеризующегося впадением притоков под прямым углом в главный водоток. Известно, что такой рисунок наблюдается в некоторых крупных зияющих трещинах отрыва [Белоусов и др., 2006] (рис. 5). В то же время интерпретация перистого рисунка эрозионной сети как индикатора морфоструктур растяжения не является общепринятой – например, согласно [Кизевальтер и др., 1981], он характерен для молодых

складчатых или глыбово-складчатых гор и нередко отражает линейные тектонические структуры. Однако проведенные нами исследования показали, что линейные зоны, где наблюдается перистый рисунок эрозионной сети, ориентированы закономерно: практически все они расположены на Тихоокеанском побережье и простираются по азимуту

130–140° (см. рис. 2, 3). Эта упорядоченность, согласующаяся с представлениями об общем юго-восточном сжатии Южных Курил, косвенным образом свидетельствует в пользу предположения о том, что линейные понижения рельефа с перистым рисунком эрозионной сети на Урупке связаны с зонами растяжения.

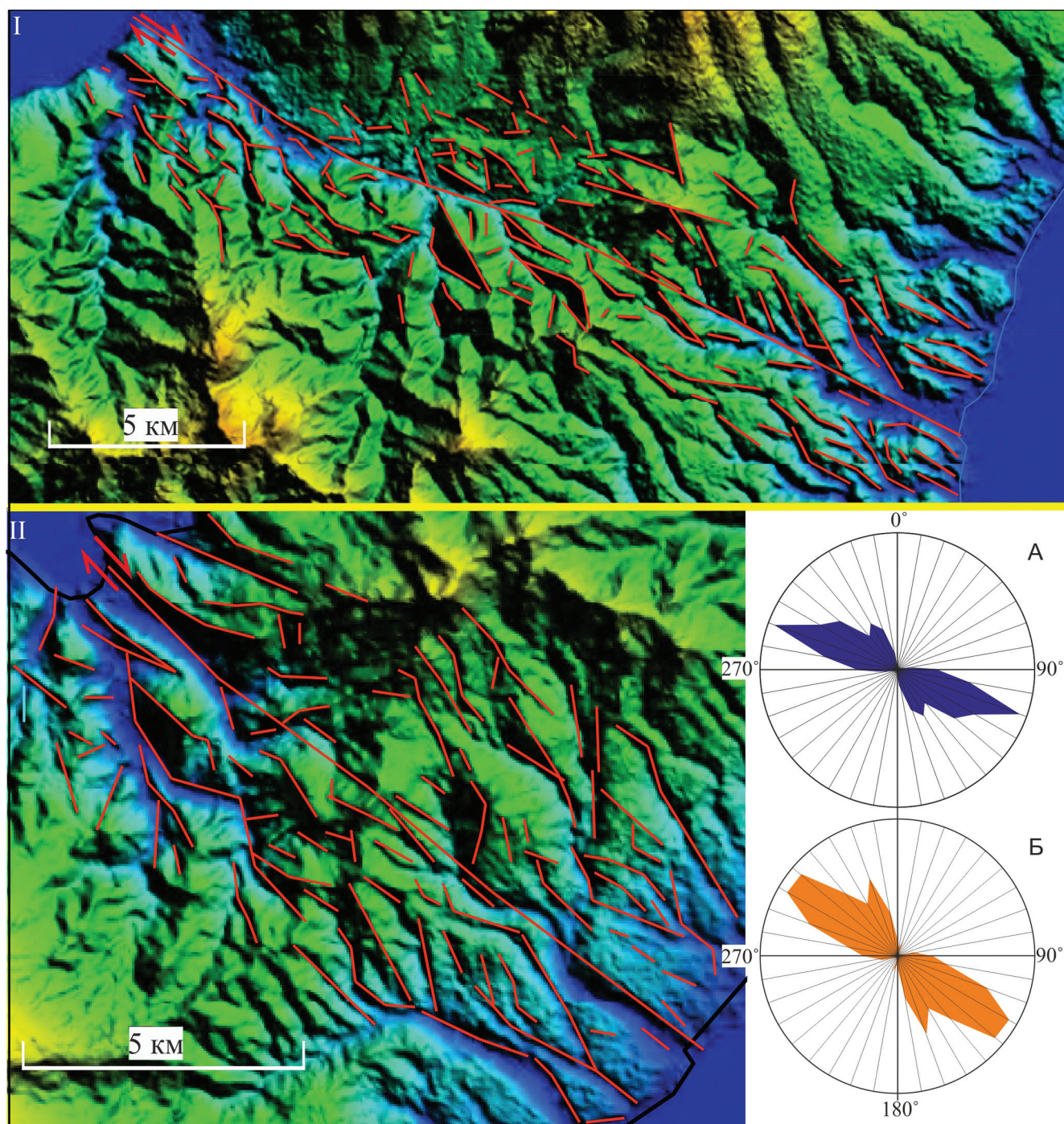


Рис. 4. Схемы линейментов двух опорных участков острова Уруп:

I – район р. Рыбной; II – район Сквознякового перешейка. Справа сверху – розы-диаграммы простираения линейментов для участков I (А) и II (Б). Красные стрелки – направления перемещения по разломам сдвиговой кинематики

Fig. 4. Schemes of lineaments of two reference sites on the Urup Island:

I – area of the Rybnaya River; II – area of the Skvoznyakovy isthmus. Top right – rose-diagrams of lineament extension for sections I (A) and II (B). Red arrows are the directions of movement along the supposed shear zones

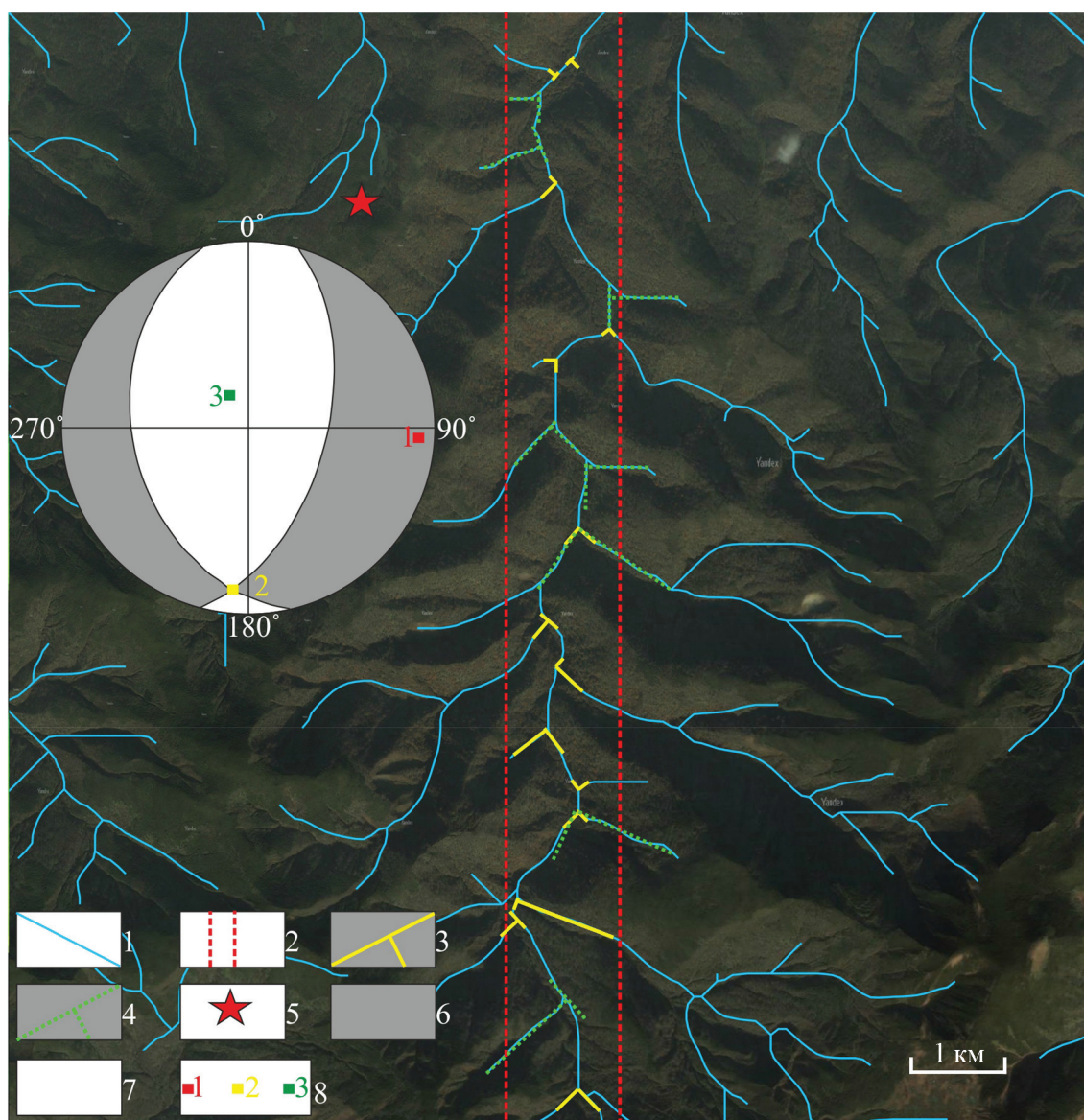


Рис. 5. Схема эрозионной сети в районе эпицентра землетрясения 1989 г. с известным решением фокального механизма очага, составленная в программе Global Mapper:
 1 – эрозионная сеть; 2 – генеральное направление водотока субмеридионального простирания; 3 – участки слияния небольших водотоков под прямым углом; 4 – участки, где водотоки ориентированы ортогонально друг относительно друга; 5 – эпицентр землетрясения 1989 г.; на стереограмме показано решение фокального механизма очага этого землетрясения (нижняя полусфера): 6 – области растяжения; 7 – области сжатия; 8 – положения главных нормальных осей напряжений (1 – растяжение; 2 – промежуточная; 3 – сжатие)

Fig. 5. The scheme of erosion network in the area of the 1989 earthquakes with a known solution of the focal mechanism, compiled in the Global Mapper program:

1 – erosion network; 2 – general direction of the submeridional watercourse; 3 – areas of confluence of small watercourses at right angles; 4 – areas where the watercourses are oriented orthogonally relative to each other; 5 – the epicenter of the 1989 earthquake; the stereogram shows the solution of the focal mechanism of the earthquake (lower hemisphere): 6 – areas of tension; 7 – areas of compression; 8 – position of the main normal stress axes (1 – stretching; 2 – intermediate; 3 – compression)

Структурно-геоморфологические данные дополнены реконструкцией главных нормальных осей напряжений по замерам трещиноватости. Четыре из пяти точек замеров находятся на полуострове Кастрикум в пределах единого блока, ограниченного «слабыми» зонами, поэтому для них построена общая стереограмма, иллюстрирующая поло-

жение главных нормальных осей напряжений. На ней показано, что трещины возникли в сдвиговой обстановке: ось сжатия погружается под углом 5° по азимуту 307° , ось растяжения – под углом 3° по азимуту 217° . Эта реконструкция также согласуется с ранее приведенными данными о современном напряженном состоянии острова (рис. 2, IV).

ВЫВОДЫ

Показана блоковая делимость рельефа Урупа в двух главных направлениях – северо-восточном и юго-восточном, находящим отражение в поле трещиноватости, изученной на масштабном уровне отдельных обнажений на юго-восточной оконечности острова.

Судя по ориентировкам большого количества малых линейных форм рельефа под углом, близким к 45°, относительно направлений простирания разрывных нарушений на Сквозняковом перешейке и в долине реки Рыбной, эти выраженные в рельефе разломы развиваются как правые сдвиги на современном этапе.

Выделены 13 участков, где притоки расположены эшелонировано как трещины отрыва при правом

сдвиге относительно водотоков более старшего порядка, ориентированных в северо-восточном направлении.

По перистому рисунку эрозионной сети выделены 19 предполагаемых зон растяжения, большая часть которых ориентирована по азимуту 130–140°.

По замерам трещиноватости реконструировано сдвиговое поле напряжений (ось сжатия простирается по азимуту 127°) на полуострове Кастрикум.

Из обобщения перечисленных выводов следует, что полученные нами геоморфологические данные хорошо согласуются с представлениями о сдвиговых деформациях Южных Курил в целом, происходящих при юго-восточном сжатии территории.

Благодарность. Исследование выполнено в рамках государственных заданий ИФЗ РАН (А.А. Сенцов, А.О. Агибалов), ГИН РАН (А.В. Полещук) и ЦЭМИ РАН (Е.Ю. Хрусталева).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арлюкова К.Р., Сагир А.В., Соломина Д.В. Особенности геологического строения Айнского золоторудного месторождения острова Уруп, Курилы // Волынцовские чтения. Материалы I Всероссийской конференции по петрологии и геохимии зон перехода «океан – континент», посвященной памяти Олега Назаровича Волынца. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2018. С. 69–70.
- Атлас Курильских островов. Москва; Владивосток: Дизайн. Информация. Картография, 2009. 516 с.
- Белоусов Т.П., Акскалян Г.О., Арутюнян Т.П., Аслизаян А.А. Альпийская геодинамика, палеонапряжения и гигантские зияющие трещины на севере Аравийской платформы // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2006. Т. 81. Вып. 2. С. 3–15.
- Борискина Н.Г., Касаткин С.А., Хомич В.Г. Геология, геодинамика и благороднометалльное оруденение южного фланга Курильской островодужной системы // Успехи современного естествознания. 2019. № 8. С. 44–49.
- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 396 с.
- Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 49 с.
- Горшков Г.С. Действующие вулканы Курильской островной дуги // Молодой вулканизм СССР. Труды Лаборатории вулканологии АН СССР / отв. ред. Б.И. Пийп. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 5–70.
- Горшков Г.С. Хронология извержений вулканов Курильской гряды (1713–1952 гг.) // Труды лаборатории вулканологии АН СССР. 1954. № 8. С. 58–99.
- Златопольский А.А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46.
- Кизевальтер Д.С., Расктов Г.И., Рыжова А.А. Геоморфология и четвертичная геология (геоморфология и генетические типы отложений). М.: Недра, 1981. 215 с.
- Ковтунович П.Ю., Лебедев В.А., Чернышев И.В., Арутюнян Е.В. Хронология и эволюция магматизма острова Уруп (Курильский архипелаг) по данным К-Аг изотопного датирования и диатомового анализа // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 6. С. 32–44.
- Костенко Н.П. Геоморфология. М.: МГУ, 1999. 398 с.
- Мануилова Е.А. Новейшие структуры Западно-Сибирской плиты и их связь с нефтегазоносностью: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2022. 169 с.
- Полохин О.В. Морфологические особенности и кислотно-основные свойства почв центральной части острова Уруп (Курильский архипелаг) // Научное обозрение. Биологические науки. 2017. № 5. С. 18–22.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.
- Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22.
- Филиппова С.С., Гвоздева И.А. Особенности геологического строения и предполагаемый генезис месторождения «Айнское» Урупского рудного района (о. Уруп, Южные Курилы) // X Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». М.: Экстра-Принт, 2011. Т. 1. С. 238–239.
- Фролова Н.С., Корбутяк А.Н., Мишакина А.А., Корнач С.В. Развитие деформаций в зонах сдвига: результаты физического моделирования с использованием песка // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН: тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием. М.: ИФЗ РАН, 2016. С. 385–392.
- Allmendinger R.W., Cardozo N.C., Fisher D. Structural geology algorithms, Vectors & Tensors, Cambridge, Cambridge University Press, 2012, 302 p.
- Cardozo N., Allmendinger R.W. Spherical projections with OSX Stereonet, Computers & Geosciences, 2013, vol. 51, p. 193–205.

Tokuda S. On the echelon structure of the Japanese Archipelago, Proc. 3d, Pacific Science Congress, y. 1, Tokyo, 1928.

Электронные ресурсы

База данных решений фокальных механизмов очагов землетрясений, URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/fmechanisms/> (дата обращения 08.05.2022).

Космические снимки высокого разрешения, URL: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=52bdc7ab7fb044d98add148764eaa30a> (дата обращения 27.12.2021).

Цифровая модель рельефа ASTER GDEM, URL: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (дата обращения 10.10.2021).

Поступила в редакцию 14.02.2022

После доработки 22.09.2022

Принята к публикации 01.12.2022

GEOMORPHOLOGICAL INDICATORS OF SHEAR DISPLACEMENTS ON THE URUP ISLAND (GREAT KURIL RIDGE)

A.A. Sentsov¹, A.O. Agibalov², V.A. Zaitsev³, A.V. Poleschuk⁴, E.Yu. Khrustalev⁵

^{1,2} *Schmidt Earth Physics Institute RAS, Department VII: Coordinating and prognostic center, laboratory of fundamental problems of ecological geophysics and volcanology (703)*

³ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Dynamic Geology*

⁴ *Geological Institute RAS, Department of Tectonics, laboratory of tectonics of the consolidated crust*

⁵ *Central Economic and Mathematical Institute RAS, Department of Modeling of Production Facilities and Complexes, laboratory for simulation of the interaction of economic objects*

¹ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: alekssencov@yandex.ru*

² *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: agibalo@yandex.ru*

³ *Associate Professor, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: v.zaitsev@mail.ru*

⁴ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: anton302@mail.ru*

⁵ *Head of the Laboratory, Professor, D.Sc. in Economics; e-mail: stalev@cemi.rssi.ru*

The Urup Island, located in the southern part of the Great Kuril ridge, is an interesting object of study because its relief is very contrasting and has a significant depth of vertical dissection. It was greatly influenced by the recent tectonic processes. Judging by the geological data, the island at the present stage is located in a shear stress field with the southeastern orientation of the axis of maximum compression. It can be explained by the subduction interaction of the Pacific and Sea of Okhotsk lithosphere plates at an acute angle of about 55°. Visual and automated decoding of satellite images and digital terrain models, and the analysis of the erosion network pattern made it possible to identify geomorphologic signs of shear displacements. These include the echeloned arrangement of lineaments as separation cracks in right-lateral shear zone in the area of the Rybnaya River and on the Skvoznyakovyj isthmus, where displacements of unidentified kinematics were previously revealed. The zones, which are oriented in the north-east direction and differ in the asymmetric pattern of the drainage network, were considered: within their limits, small tributaries are located on one side of the watercourse of the highest order as megatracks of separation. In the area of the epicenter of the earthquake of 1989, which occurred under the latitudinal horizontal stretching, a linear lowering of the relief with a feathery pattern of watercourses was recorded, interpreted as a morphostructure of stretching. Similar probably stretching zones, extending mainly along the azimuth of 130–140°, were recorded on the Pacific coast of the island. Their orientation, as well as the kinematics of probable shear displacements identified from the geomorphologic data, correlates with the general ideas about the stress-strain state of the Southern Kuriles, as well as the reconstruction of the main normal stress axes of the Kastricum Peninsula performed by us from the fracture measurements. All this prove that the suggested structural-geomorphologic interpretation of the Urup Island territory is quite reasonable. In general, our new data on the configuration and kinematics of probable active shear faults and extensional morphostructures complement the existing ideas about the latest deformations of the study area.

Keywords: structural-geomorphologic analysis, shear faults, Urup, megafaults, lineaments

Acknowledgements. The research was carried out under the State tasks of the Schmidt Earth Physics Institute RAS (A.A. Sentsov, A.O. Agibalov), Geological Institute RAS (A.V. Poleschuk) and Central Economic and Mathematical Institute RAS (E.Yu. Khrustalev).

REFERENCES

- Allmendinger R.W., Cardozo N.C., Fisher D. Structural geology algorithms, Vectors & Tensors, Cambridge, Cambridge University Press, 2012, 302 p.
- Arlyukova K.R., Sagir A.V., Solomina D.V. [Features of the geological structure of the Ainu gold deposit of the Urup Island, Kuriles], *Volynovskie chteniya* [Volynets Scientific Conference], Petropavlovsk-Kamchatskij, Institut vulkanologii i sejsmologii DVO RAN, 2018, p. 69–70. (In Russian)
- Atlas Kuril'skih ostrovov* [Atlas of the Kuril Islands], Moscow, Vladivostok, Dizajn, Informaciya, Kartografiya Publ., 2009, 516 p. (In Russian)
- Belousov T.P., Akskaljan G.O., Aratynian T.P., Aslizadian A.A. Al'pijskaya geodinamika, paleonapryazheniya i gigantskie ziyayushchie treshchiny na severe Aravijskoj platformy [Alpine geodynamics, paleostresses, and giant opened cracks in Noth Arabian Platform], *Byulleten' MOIP. Otdel geologicheskij*, 2006, vol. 81, no. 2, p. 3–15. (In Russian)
- Boriskina N.G., Kasatkin S.A., Homich V.G. Geologiya, geodinamika i blagorodnometall'noe orudenenie yuzhnogo flanga Kuril'skoj ostrovoduzhnoj sistemy [Geology, geodynamics and precious metal mineralization of the southern flank of the Kuril island-arc system], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, no. 8, p. 44–49. (In Russian)
- Cardozo N., Allmendinger R.W. Spherical projections with OSXStereonet, Computers & Geosciences, 2013, vol. 51, p. 193–205.
- Filippova S.S., Gvozdeva I.A. [Features of the geological structure and the supposed genesis of the Ainskoye deposit of the Urup ore district (Urup Island, Southern Kuriles)], *X Mezhdunarodnaya konferencia "Novye idei v naukah o Zemle"* [10 International Conference New Ideas in the Earth Sciences], Moscow, Ekstra-Print Publ., 2011, vol. 1, p. 238–239. (In Russian)
- Frolova N.S., Korbutyak A.N., Mishakina A.A., Korpach S.V. Razvitie deformacij v zonah sdviga: rezul'taty fizicheskogo modelirovaniya s ispol'zovaniem peska [Development of deformations in shear zones: results of physical modeling using sand], *Chetvertaya tektonofizicheskaya konferenciya v IFZ RAN: Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle* [4th tectonophysics conference Tectonophysics and actual problems of the Earth sciences], Materialy dokladov Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Moscow, IFZ RAN, 2016, p. 385–392. (In Russian)
- Gorshkov G.S. [Active volcanoes of the Kuril Island arc], *Molodoj vulkanizm SSSR* [Young volcanism within the USSR], Trudy Laboratorii vulkanologii AN SSSR, B.I. Pijp (ed.), Moscow, AN SSSR, 1958, p. 5–70. (In Russian)
- Gorshkov G.S. Hronologiya izverzenij vulkanov Kuril'skoj gryady (1713–1952 gg.) [Chronology of volcanic eruptions of the Kuril Ridge (1713–1952)], *Trudy laboratorii vulkanologii AN SSSR*, 1954, no. 8, p. 58–99. (In Russian)
- Gorshkov G.S. *Vulkanizm Kuril'skoj ostrovnoj dugi* [Volcanism of the Kuril Island arc], Moscow, Nauka Publ., 1967, 49 p. (In Russian)
- Gzovskij M.V. *Osnovy tektonofiziki* [Fundamentals of tectonophysics], Moscow, Nauka Publ., 1975, 396 p. (In Russian)
- Kizeval'ter D.S., Rasktov G.I., Ryzhova A.A. *Geomorfologiya i chetvertichnaya geologiya (geomorflogiya i geneticheskie tipy otlozhenij)* [Geomorphology and Quaternary geology (Geomorphology and genetic types of sediments)], Moscow, Nedra Publ., 1981, 215 p. (In Russian)
- Kostenko N.P. *Geomorfologiya* [Geomorphology], Moscow, MGU Publ., 398 p. (In Russian)
- Kovtunovich P.Yu., Lebedev V.A., Chernyshev I.V., Arutyunyan E.V. Hronologiya i evolyuciya magmatizma ostrova Urup (Kuril'skij arhipelag) po dannym K-Ar izotopnogo datirovaniya i diatomovogo analiza [Chronology and evolution of magmatism of the Urup Island (Kuril Archipelago) from K-Ar isotope datings and diatomic analysis], *Tihookeanskaya geologiya*, 2004, vol. 23, no. 6, p. 32–44. (In Russian)
- Manuilova E.A. *Novejshie struktury Zapadno-Sibirskoj plity i ih svyaz s neftegazonosnost'yu* [Recent structures of the West Siberian plate and their relationship with oil and gas potential], Dissertation of Ph.D. in Geology and Mineralogy, Moscow, 2022, 169 p. (In Russian)
- Polohin O.V. Morfologicheskie osobennosti i kislotno-osnovnye svoystva pochv central'noj chasti ostrova Urup (Kuril'skij arhipelag) [Morphological features and acid-base properties of soils of the central part of the island of Urup (Kuril Archipelago)], *Nauchnoe obozrenie, Biologicheskie nauki*, 2017, no. 5, p. 18–22. (In Russian)
- Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. *Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam, Metody i algoritmy* [From sliding mirrors to tectonic stresses, Methods and algorithms], Moscow, GEOS Publ., 2017, 234 p. (In Russian)
- Sim L.A. Izuchenie tektonicheskikh napryazhenij po geologicheskim indikatoram (metody, rezul'taty, rekomendacii) [The study of tectonic stresses by geological indicators (methods, results, recommendations)], *Izvestiya VUZov, Geologiya i razvedka*, 1991, no. 10, p. 3–22. (In Russian)
- Tokuda S. *On the echelon structure of the Japanese Archipelago*, Proc. 3d, Pacific Science Congress, y. 1, Tokyo, 1928.
- Zlatopolsky A.A. Novye vozmozhnosti tehnologii LESSA i analiz tsifrovoj modeli reliefa, Metodicheskij aspekt [New LESSA technology resources and digital terrain map analysis, Methodology], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, vol. 5, no. 1, p. 102–112. (In Russian)
- Web sources*
- Digital elevation model ASTER GDEM, URL: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (access date 10.10.2021).
- High-resolution satellite images, URL: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=52bdc7ab7fb044d98add148764eaa30a> (access date 27.12.2021).
- ISC Bulletin: Focal mechanism search, URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/fmechanisms/> (access date 8.05.2022).

Received 14.02.2022

Revised 22.09.2022

Accepted 01.12.2022