

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ КУРИЛЬСКОЙ ДУГИ В РАЙОНЕ о. ИТУРУП ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ

©2025 Д.С. Мягков¹, Д.Е. Белобородов¹, И.В. Бондарь¹, Т.Ю. Тверитинова^{1,2}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, 123242; email: dsm@ifz.ru

²Геологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 119234

Поступила в редакцию 21.02.2024; после доработки 01.05.2025; принята в печать 25.09.2025

Во время двух комплексных экспедиций на о. Итуруп (2019 и 2022 гг.) исследована позднеальпийская трещиноватость, в том числе кинематическая, четвертичных вулканов (Медвежий, Чирип, Баранского) и плиоценовых вулканогенно-осадочных толщ цоколя вулканов в центральной части острова. Результаты анализа трещиноватости на основе парагенетического и катакластического методов позволяют утверждать, что она формировалась в условиях интерференции регионального и локального полей напряжений. Региональное поле палеонапряжений неогена–плейстоцена проявлено в структурном плане о-ва Итуруп. В нем преобладает обстановка северо-западной ориентации оси главного сжатия и северо-восточного — оси растяжения при сдвиговом поле напряжений. Локальные поля палеонапряжений связаны с развитием вулканических построек — они отражены в присутствии в вулканиках трещин, образующих пояса тектодинамического вращения и течения. Также методом катакластического анализа разрывных смещений получены данные о состоянии современного поля напряжений для коры Итурупа. Выделены стресс-состояния для северо-западной части острова с напряженным состоянием типа «горизонтальное сжатие со сдвигом» и стресс-состояния для юго-восточной части с напряженным состоянием «горизонтальное растяжение со сдвигом».

Ключевые слова: тектонофизика, напряженное состояние, метод катакластического анализа, палеостресс, трещиноватость.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящего исследования являлось получение параметров напряженного состояния верхней части коры о. Итуруп (рис. 1) — среднего из трех (Кунашир, Итуруп, Уруп) островов южного сегмента Большой Курильской гряды (БКГ) на неотектоническом этапе развития и сравнение ее с особенностями современного регионального поля напряжений южных Курил. Параметры современного напряженного состояния получены на основе изучения трещиноватости осадочно-вулканогенных и вулканических пород острова во время экспедиций «Восточный бастион — Курильская гряда», организованных Русским географическим обществом совместно с Экспедиционным центром Министерства обороны Российской Федерации в 2019 и 2022 гг.

Проведены замеры трещиноватости в вулканогенно-осадочных породах в центральной (вулканы Чирип, Баранского, бухта Черная, залив Касатка) и северной частях о. Итуруп (г. Медвежья). При анализе трещиноватости использовались структурно-кинематический и катакластический методы тектонофизического анализа дизъюнктивных структур.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Остров Итуруп, вместе с островами Кунашир и Уруп, представляет элемент южной части БКГ (Атлас..., 2009; Горшков, 1967; Ермаков, 1997). Все три острова вытянуты в северо-восточном направлении, образуя вместе эшелонированную систему восток-северо-восточного простирания.

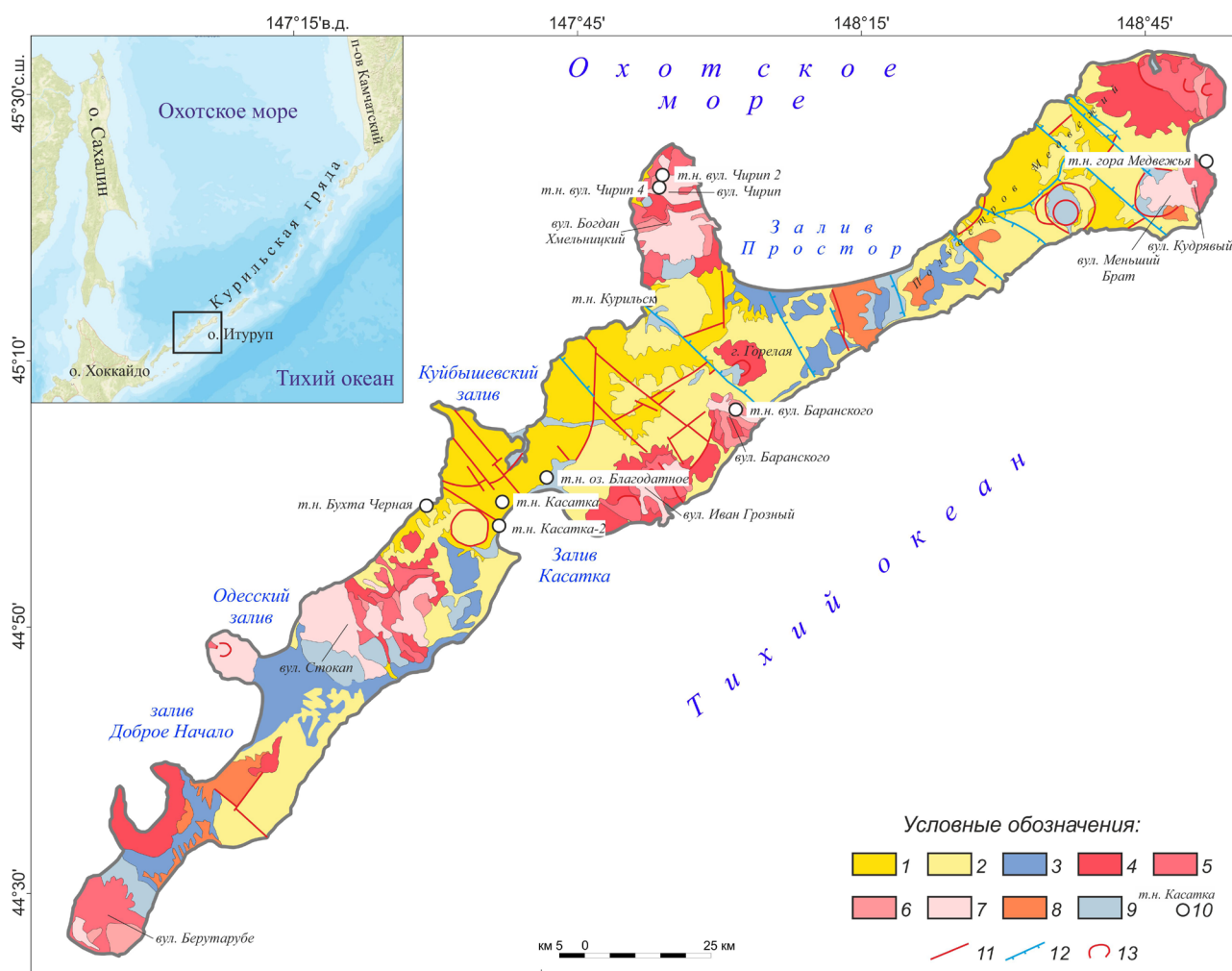


Рис. 1. Расположение точек наблюдения на геологической карте о-ва Итуруп (Государственная..., 1974, с упрощениями). На врезке — о-в Итуруп в системе Курильской островной дуги. 1–2 — вулканические комплексы: 1 — рыбаковский андезитовый, поздний миоцен, 2 — фрегатский андезибазальтовый, поздний плиоцен — ранний эоплейстоцен; 3 — морские отложения, средний-поздний неоплейстоцен; 4–7 — пачки богатырского андезитового вулканического комплекса, средний-поздний неоплейстоцен — голоцен: 4 — первая, 5 — вторая, 6 — третья, 7 — четвертая; 8 — роковский дацитовый вулканический комплекс, поздний неоплейстоцен; 9 — морские отложения, голоцен; 10 — положение точек наблюдения и их названия; 11–13 — разрывные нарушения: 11 — неустановленной морфологии, 12 — сбросы, с указанием направления падения сместителя, 13 — разломы, ограничивающие вулканотектонические структуры (кальдеры).

Fig. 1. Location of observation points on the geological map of Iturup Island (State..., 1974, with simplifications). Inset shows Iturup Island in the Kuril island arc system. 1–2 — volcanic complexes: 1 — Rybakovsky andesitic, late Miocene; 2 — Fregatsky andesite-basaltic, late Pliocene — early Eopleistocene; 3 — marine sediments, middle-late Neopleistocene; 4–7 — bench of the Bogatyrsky andesitic volcanic complex, middle-late Neopleistocene — Holocene: 4 — first, 5 — second, 6 — third, 7 — fourth; 8 — Rokovsky dacite volcanic complex, late Neopleistocene; 9 — marine sediments, Holocene; 10 — position of observation points and their names; 11–13 — faults: 11 — unidentified morphology, 12 — normal faults with direction of the fault plane fall, 13 — faults bounding volcano-tectonic structures (calderas).

Итуруп вытянут на 200 км при ширине от 7 до 27 км. Примерно такие же параметры имеют о-ва Кунашир (123 на 30 км) и Уруп (116 на 20 км). На о. Итуруп насчитывается 20 вулканов (рис. 1), девять из которых действующие (Горшков, 1967). Вулканические постройки имеются не только на острове, но и под водами Охотского моря (Гаврилов, 2023; Подводный..., 1992). БКГ представляет внутреннюю вулканическую дугу Курильской

части Курило-Камчатской зоны субдукции. Восточнее расположены: междуговой прогиб, отделяющий БКГ от внешней Малой, а еще восточнее — глубоководный Курило-Камчатский желоб. БКГ заложена на гетерогенном континентальном основании. В условиях субдукции объем островной суши с течением времени уменьшается. Перед Малой Курильской грядой, в основании континентального склона выделяется

хаотический грубообломочный комплекс, образовавшийся пододвиганием Тихоокеанской плиты под островную дугу и являющейся преддуговой частью аккреционного комплекса (Ермаков, 1997).

Вблизи Курильской островной дуги выявлены системы подводных очаговых тектономагматических систем, закономерности размещения которых определяются зонами магмоконтролирующих разломов и узлами их пересечения (Гаврилов, 2023). В зоне перехода от Большой Курильской гряды к океану, как единой геодинамической системы, выражено три субпараллельных глубинных разлома надвигового типа (Ермаков и др., 1989). Для региона характерно также присутствие системы сквозных меридиональных разломов, не нарушающих цепочки вулканических построек (Гаврилов, 2023). Вулканические постройки образуют на южных островах БКГ (Кунашир, Итуруп и Уруп) цепочки субмеридионального простирания, на о. Итуруп такая закономерность особенно хорошо выражена (рис. 1). Это, с учетом северо-восточного простирания островов, позволяет предполагать вдоль них дополнительную левосдвиговую составляющую (в горизонтальной плоскости). Кроме того, в проливах между островами можно предположить наличие северо-западного, поперечного дуге, простирания, по которому каждый остров смещен, в плане, относительно соседнего влево.

Главной тектодинамической обстановкой формирования системы структур БКГ и, вероятно, всей Курильской островной дуги, является северо-западное сжатие в условиях поддвига Тихоокеанской плиты под островную дугу в северо-западном направлении. Можно предположить, что значение могут иметь также наличие или отсутствие сдвиговой компоненты поля напряжений, субгоризонтальных субширотного растяжения и субмеридионального сжатия, в относительном перемещении Тихого океана и Курильской дуги, определяющие условия формирования на ней систем вулканических построек преимущественно вдоль субмеридиональных направлений, а также вероятно, диагональных по отношению к ним сдвиговых структур.

Для о. Итуруп характерно наличие типичных островодужных образований, представленных разнофациальными вулканогенно-осадочными породами миоцена–плиоцена мощностью порядка около тысячи метров (Витухин и др., 1996; Геологическая..., 1974). Широко распространены «зеленые туфы» (Горшков, 1967), сформировавшиеся под влиянием современной либо древней гидротермальной и вулканической деятельности. Вулканиды

имеют в основном средний и кислый состав, что связано со значительной мощностью островодужной коры Итурупа (Ермаков и др., 1989). Вулканогенно-осадочные породы прорваны комагматичными им субвулканическими и экструзивно-жерловыми образованиями. Вулканогенный комплекс миоцена–плиоцена несогласно перекрыт плейстоцен–голоценовыми вулканитами.

Структура Итурупа, как и других островов южного сегмента БКГ представлена антиклинальным поднятием, в ядре которого вскрыты в основном миоцен–плиоценовые вулканиты рыбаковской толщи, крылья сложены плиоцен–четвертичными образованиями фрегатской, камуйской и головнинской толщ (Витухин и др., 1996; Геологическая..., 1974). На неоген-раннеплейстоценовых отложениях залегают четвертичные морские отложения и вулканические образования наиболее молодого богатырского андезитового комплекса (Витухин и др., 1996; Геологическая..., 1974). Четвертичные вулканические постройки представлены стратовулканами и кальдерными вулканами, со многими из которых связаны активные проявления сольфатарной и гидротермальной деятельности (Геологическая..., 1974).

Породы вулканогенно-осадочных комплексов дислоцированы относительно слабо (Геологическая..., 1974; Сергеев, 1976). Слои залегают под углами порядка 20–30° с уменьшением углов наклона в более молодых образованиях. В неогеновых толщах развиты разрывные нарушения северо-восточного и северо-западного простирания. Ориентированные вдоль острова разрывы северо-восточного простирания представлены крутыми сбросами или взбросами, нарушения северо-западной ориентировки выражены преимущественно малоамплитудными сдвигами.

Четвертичные вулканические постройки на о. Итуруп (рис. 1) образуют Северную, Центральную и Южную вулканические группы (Геологическая..., 1974). В Северную вулканическую группу входят вулканы Кудрявый, кальдерный вулкан Камуй, Цирк, Медвежий. Крупнейшая Центральная вулканическая группа включает вулканы Чирип, Богдана Хмельницкого, Баранского, Тебенькова, Иван Грозный и Буревестник. К центральной группе можно отнести кальдеру у перешейка Ветрового. Южная группа представлена вулканами Атсунпури и Берутарубе, кальдерными вулканами Львиная пасть и Урбич.

По расположению вулканических построек можно наметить структурно-тектонические зоны северо-восточного и север-северо-восточного простирания.

МЕТОДИКА РАБОТ

Исходными данными являются замеры пространственной ориентировки геологических стресс-индикаторов: зеркал скольжения, трещиноватости, жил, даек и других. Замеры были получены в обнажениях скальных пород с помощью геологического компаса. При анализе полученных полевых данных использовались два основных метода анализа — структурно-парагенетический и катакластический.

Основы структурно-парагенетического метода были заложены Г.Д. Ажгиреем, А.В. Лукьяновым и развиты Л.М. Расцветаевым (1987). Метод предполагает рассмотрение всей системы складчато-разрывных структур в их взаимосвязи и выявлении среди них закономерно организованных в пространстве парагенезисов, обусловленных действием общего динамического фактора. Речь идет о присутствии в геологическом объеме разнообразных (складчатых, разрывных, смешанных) структур сжатия, растяжения и сдвига (и их разнообразных сочетаний), отражающих его общую квазипластическую деформацию. Кинематические особенности сходно ориентированных структур статистически характеризуются одинаковыми кинематическими параметрами. Действие полей напряжений, определяющих кинематику региональных структурных парагенезисов, активизирует кинематогенные поля напряжений, приводящих к формированию локальных структурных парагенезисов. Кроме того, процессы накопления напряжений в породных массивах и их деформирования, хотя и тесно связаны, но все-таки чаще чередуются друг с другом. Наиболее отчетливо это проявляется на структурах различных порядков. Наблюдается сочетание в одном и том же геологическом объеме структур разного порядка, характеризующихся разной кинематикой при сходной ориентировке.

Для построения тектонофизической реконструкции напряженного состояния использовался метод катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого (Ребецкий, 2007). Данный метод может использовать в качестве входных сейсмологические данные, либо замеры по зеркалам скольжения. В последнем случае производится реконструкция ориентаций главных осей тензора напряжений и, соответственно, геодинамического типа напряженного состояния. Теоретические основы методики полностью тождественны как для реконструкций по зеркалам скольжения, так и по механизмам очагов. В первом случае реконструируется палеостресс, во втором — современное напряженное состояние. Реконструкция (по очагам) проводится в несколько этапов. На первом этапе по энер-

гетическим критериям теории пластичности определяются ориентации главных осей и вид тензора напряжений и сейсмоструктурных деформаций и создается однородная выборка землетрясений (ОВЗ). На втором этапе по анализу ОВЗ на диаграмме Мора (Ребецкий, 2007) рассчитываются нормированные напряжения и производится выбор реализованных плоскостей для событий из ОВЗ. На третьем этапе (переход к которому осуществляется при использовании дополнительных данных — о сброшенных в очаге напряжениях) могут быть получены параметры прочности и величины эффективных напряжений. На четвертом этапе (при наличии данных о литостатическом давлении) определяются величины напряжений и, также, флюидное давление.

СЕЙСМОПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЮЖНЫХ КУРИЛ

Для южного фланга Курило-Камчатской зоны субдукции построен сейсмический разрез по данным сейсмического профиля с использованием наземных и донных сейсмоприемников (профиль проходит через западную оконечность о. Хоккайдо в области сочленения Курило-Камчатской и Японской зон субдукции) (Nakanishi, 2009). Основные особенности разреза (рис. 2) обобщены в работе (Thybo, Artemieva, 2013), а строение задуговой части разреза подробно описано в работе (Nakanishi et al., 2004). Кора преддугового бассейна до глубины 10 км охарактеризована в работе (Kurashimo et al., 2007).

Помимо низкоскоростных комплексов осадочного чехла уверенно выделяется верхняя островодужная земная кора со скоростями продольных волн 5.8–6.2 км/с. Под ней залегает тонкая средняя земная кора, постепенно переходящая в высокоскоростную нижнюю кору, прослеживающуюся на профиле только между 150 и 315 км и выклинивающаяся в сторону коры задугового бассейна со снижением скоростей до 6.5–6.7 км/с. Мощность нижней коры составляет до 20 км на расстоянии до 200 км, но, в сторону Хоккайдо это расстояние увеличивается до 260 км, тогда как в сторону Курильской дуги, по всей видимости, уменьшается. Скорости продольных волн в нижней части земной коры — 6.7–7.3 км/с. В восточном направлении скорости снижаются до 6.3–6.5 км/с. Глубина Мохо между отметками 220–235 км профиля располагается на глубине ~33 км. Приповерхностная низкоскоростная (до 5 км/с) кора состоит из вулканокластических осадков. Эти отложения разделяются на неоген-четвертичную и меловую вулканокластические толщи (Kurashimo et al., 2007).

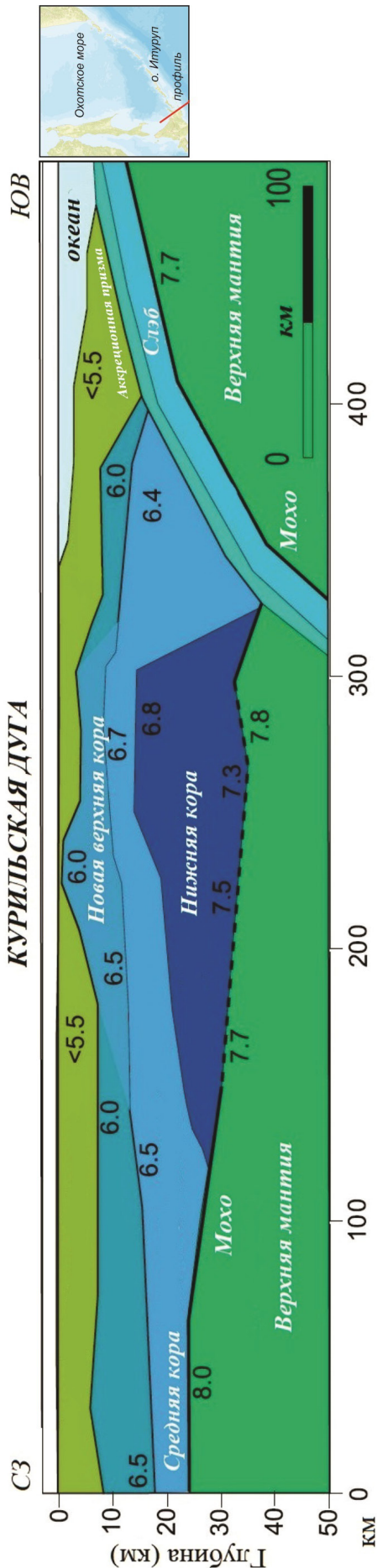


Рис. 2. Обобщенный сейсмический разрез через южную оконечность Курильской дуги по (Тубо, Artemieva, 2013) с изменениями. Цифрами обозначена скорость р-волн в км/с. Положение профиля показано на врезке.

Fig. 2. Generalized seismic section through the southern tip of the Kuril Arc from the work (Tubо, Artemieva, 2013) with changes. The numbers indicate the speed of p-waves in km/s. The position of the profile is shown in the inset.

Современное напряженное состояние южной части литосферы Курило-Камчатской зоны субдукции представлено в работах (Полец, Злобин, 2014; Ребецкий, 2009; Сафонов, 2021). К сожалению, явного решения обратной задачи тектонифизики для коры островной дуги (на глубинах 0–30 км) для Южных Курил нет, однако существует (Полец, Злобин, 2014) реконструкция напряженного состояния для малых и средних глубин (0–30 км и более, до 120 км) для литосферы Тихоокеанской плиты перед южной частью Курильской дуги. Выявлена следующая закономерность: оси максимального и минимального сжатия практически ортогональны простиранию желоба. Ось максимального сжатия наклонена по слэбу, ось минимального — вдоль склона дуги наклонена к океанической плите. Промежуточная ось ориентирована субгоризонтально параллельно желобу. Для малых глубин (0–30 км) преимущественно характерен режим горизонтального сжатия.

Детальная тектонофизическая реконструкция построена Д.А. Сафоновым (2021) для промежуточных глубин (50–250 км) литосферы Курильской островной дуги. Представленные им решения относятся к зоне контакта тектонических плит и, строго говоря, описывают напряженное состояние океанической и континентальной литосферы вдоль слэба. Для района Итуруп и сопредельных территорий южных Курил Д.А. Сафонов (2021) использовал каталог NIED 2000–2019 гг. (рис. 3) и GСMT 1976–2019 гг. В целом для литосферы в области Итуруп получено решение (по обоим каталогам) с режимом горизонтального сжатия и отдельными кластерами с режимом горизонтального сдвига. В отличие от закономерности для напряжений в области тальвега желоба (Полец, Злобин, 2014), Д.А. Сафонов (2021) получил преимущественно смещенное на 30–40° против часовой стрелки относительно простирания желоба поле ориентаций осей максимального сжатия, что предположительно связано с праводвиговой компонентой в поддвиге Тихоокеанской плиты.

Приведенные реконструкции не описывают напряженное состояние земной коры. Поэтому авторы настоящей статьи реконструировали напряженное состояние земной коры методом МКА в интервале глубин 0–30 км в районе о. Итуруп и соседних акваторий — в задуговой и преддуговой частях дуги. Такие механизмы соотносятся с напряженным состоянием коры островной дуги и, отчасти, зоны контакта со слэбом. Основная проблема заключается в малом количестве событий с магнитудой 4–5, которые могли бы характеризовать региональное напряженное состояние коры Итуруп. В подборке из каталога NEID не брались события с магнитудой

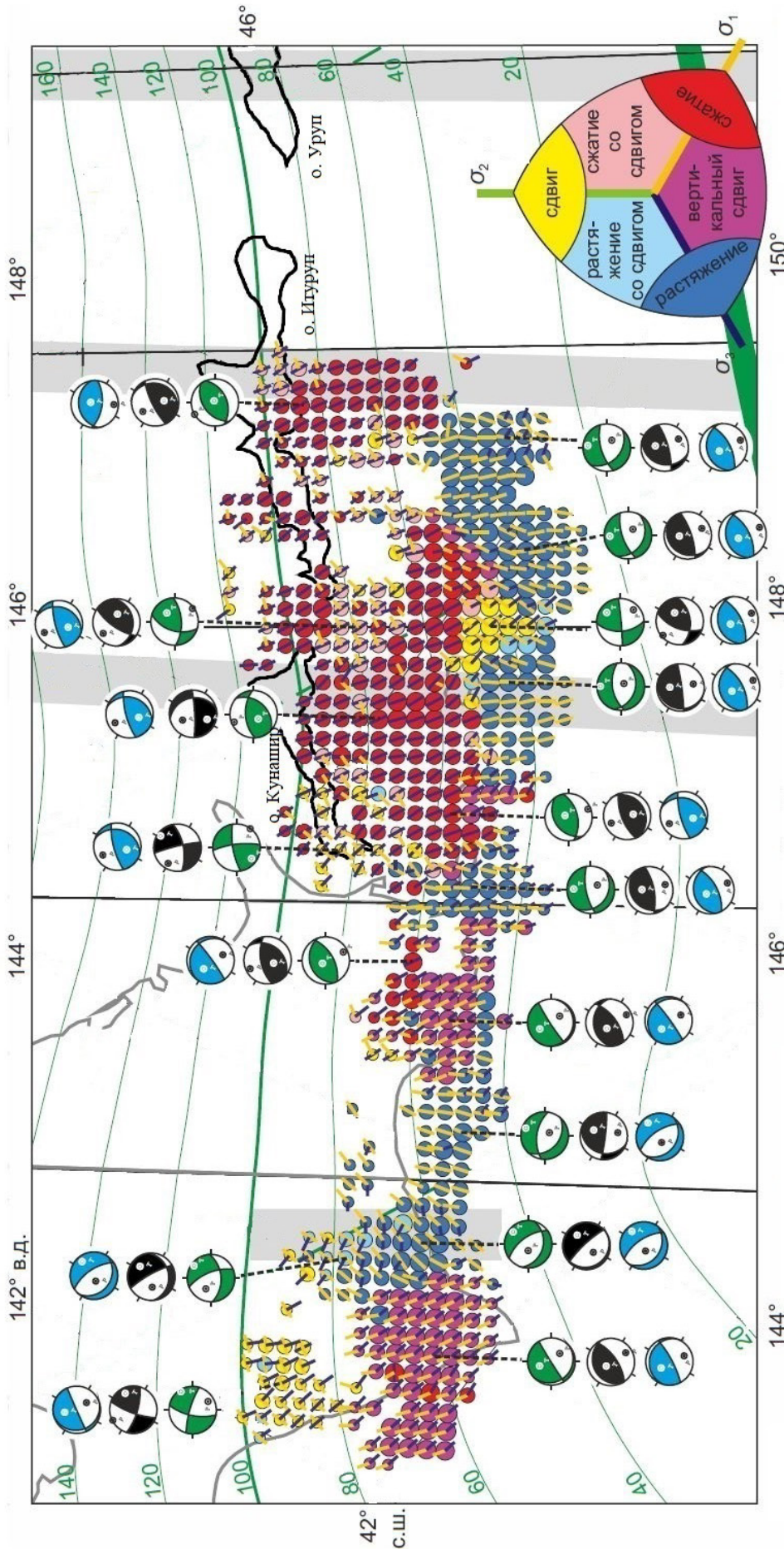


Рис. 3. Результаты тектонофизической реконструкции для коры Южных Курил на глубинах 50–250 км, полученные по методу МКА Ю. Л. Ребецкого (Ребецкий, 2007) из работы (Сафонов, 2021) с изменениями. Окружностями показаны кластеры с реконструированным типом напряженного состояния, цвет соответствует геодинамическому типу напряженного состояния относительно слэба. Для некоторых кластеров поле напряжений показано в виде механизма очага: зеленые — в проекции на плоскость слэба, черные — в проекции на поверхность Земли, голубые — по данным С.В. Христовой. Зелеными линиями показаны изолинии глубины верхней границы сейсмофокальной области.

Fig. 3. Results of tectonophysical reconstruction for the crust of the Southern Kuril Islands at depths of 50–250 km, obtained using the MCA method by Yu. L. Rebetsky (Rebetsky, 2007) from the work (Safonov, 2021) with changes. The circles show clusters with the reconstructed type of stress state, the color corresponds to the type of stress state in the slab plane. For some clusters, the stress field is shown like a focal mechanism: with green — in the projection on the slab plane, black — in the projection on the geoid surface, blue — according to S.V. Khristova. Green lines show the depth contours of the upper boundary of the seismic focal region.

значительно ниже 4, в среднем магнитуда варьировалась около значения 5 (таблица). Восстановленное по такому набору напряженное состояние будет относиться к крупным участкам островодужной коры и не учитывать локальные особенности поля напряжений.

Несмотря на малое количество событий, удалось выделить две области с четырьмя различными стресс-состояниями, два из которых относятся к геодинамическому типу напряженного состояния «сжатие со сдвигом», а два — к «растяжению со сдвигом» (рис. 4). Первый тип стресс-состояния относится к точке с координатами (147.5000° в.д. и 45.2500° с.ш.) и может быть отнесен к коре задугового бассейна и, предположительно, к коре северо-западной части центра о. Итуруп, а второй — к коре передовой части дуги в юго-восточной части Итурупа и к зоне контакта со слэбом. Для северо-западной части о. Итуруп получено два близких стресс-состояния (в одной точке) с ориентацией оси максимального сжатия σ_3 63° и 75°. Ось минимального сжатия σ_1 субгоризонтальна и простирается в юго-западном направлении. Промежуточная ось σ_2 субвертикальна и простирается на северо-восток. Для коры юго-восточной части о. Итуруп также получены два очень близких стресс-состояния, однако уже для сравнительно большой области, охватывающей южную оконечность Итурупа. Здесь основное стресс-состояние формально относится к типу «растяжение со сдвигом», что, по сути, является схожим типом с «врезывым» состоянием (при котором углы с горизонтальной плоскостью всех главных осей равны) с относительно горизонтальной осью растяжения. Азимуты главных осей тензора напряжений — 151.0°, 352.1°, 250.1° и 141.2°, 350.1°, 249.2° (σ_3 , σ_2 и σ_1 соответственно (рис. 4)).

В отличие от расположенного севернее стресс-состояния, южная часть полученного поля напряжений имеет направление проекции оси σ_3 в крест простираения зоны субдукции, тогда как для северной части решения ось сжатия повернута против часовой стрелки, так же, как и в тектонофизической реконструкции Д.А. Сафонова (2021) (для глубин более 50 км).

Полученная нами реконструкция, несмотря на малочисленность входных данных, является ориентиром для неоген-плейстоценовых палеостресс-состояний, что позволяет сделать авторам некоторые выводы о геодинамике Итурупа в целом. Так же, как и в реконструкциях, использующих механизмы промежуточных глубин (Сафонов, 2021), для напряженного состояния коры получен разворот по часовой стрелке проекции σ_3 , который можно объяснить правосторонней компонентой движения Тихоокеанской плиты относительно Курильской гряды. Однако для Курильской островной дуги существенно более субвертикальная ориентация оси σ_3 возможно указывает на ее взаимодействие с «дослэбовой» частью океанической плиты, которая находится в обстановке горизонтального растяжения (для Японской зоны субдукции подобное напряженное состояние непосредственно получено по данным тектонофизических реконструкций (Ребецкий, Полец, 2021) и предполагается для Курило-Камчатской зоны субдукции (Ребецкий, Тверитинова, 2024)). Также, возможно, такое напряженное состояние объясняется моделью Ш. Маруяма с соавторами (2018) о надвигании передового фланга коры на аккреционный комплекс после его погружения на поздней стадии его формирования. Эта версия хорошо сочетается с сейсмическими данными о

Каталог механизмов, использованных для получения тектонофизической реконструкции напряженного состояния коры Итурупа по методу МКА Ю.Л. Ребецкого. Для определения ориентации сместителя используется стандартная система обозначений Strike-Dip-Slip (столбцы 7–12). Магнитуда (столбец 3) — магнитуда по поверхностным волнам

Catalog of mechanisms used to obtain tectonophysical reconstruction of the stress state of the Iturup crust using the Yu.L. Rebetsky MCA method. The standard Strike-Dip-Slip notation (columns 7–12) is used to determine the orientation of the fault. Magnitude (columns 3) is the magnitude of the surface waves

№	Год	Магнитуда	Долгота, град.	Широта, град.	Глубина, град.	Strike, град.	Dip, град.	Slip, град.	Strike, град.	Dip, град.	Slip, град.
1	1988	5.2	14.41	44.88	15	162	20	-4	256	89	-110
2	1994	6.1	147.31	44.22	25.6	94	7	-126	311	84	-86
3	2001	3.9	146.41	43.83	14	268	68	-149	165	61	-26
4	2001	5.2	147.66	44.35	24.5	337	14	-151	218	83	-78
5	2001	5.3	147.43	44.41	44	232	15	96	45	75	88
6	2013	5	148.18	45.24	17.3	0	25	86	185	65	92
7	2014	5	147.06	45.12	18.1	30	29	82	219	61	94
8	2016	4.9	147.26	45.3	22.6	12	32	53	233	65	111

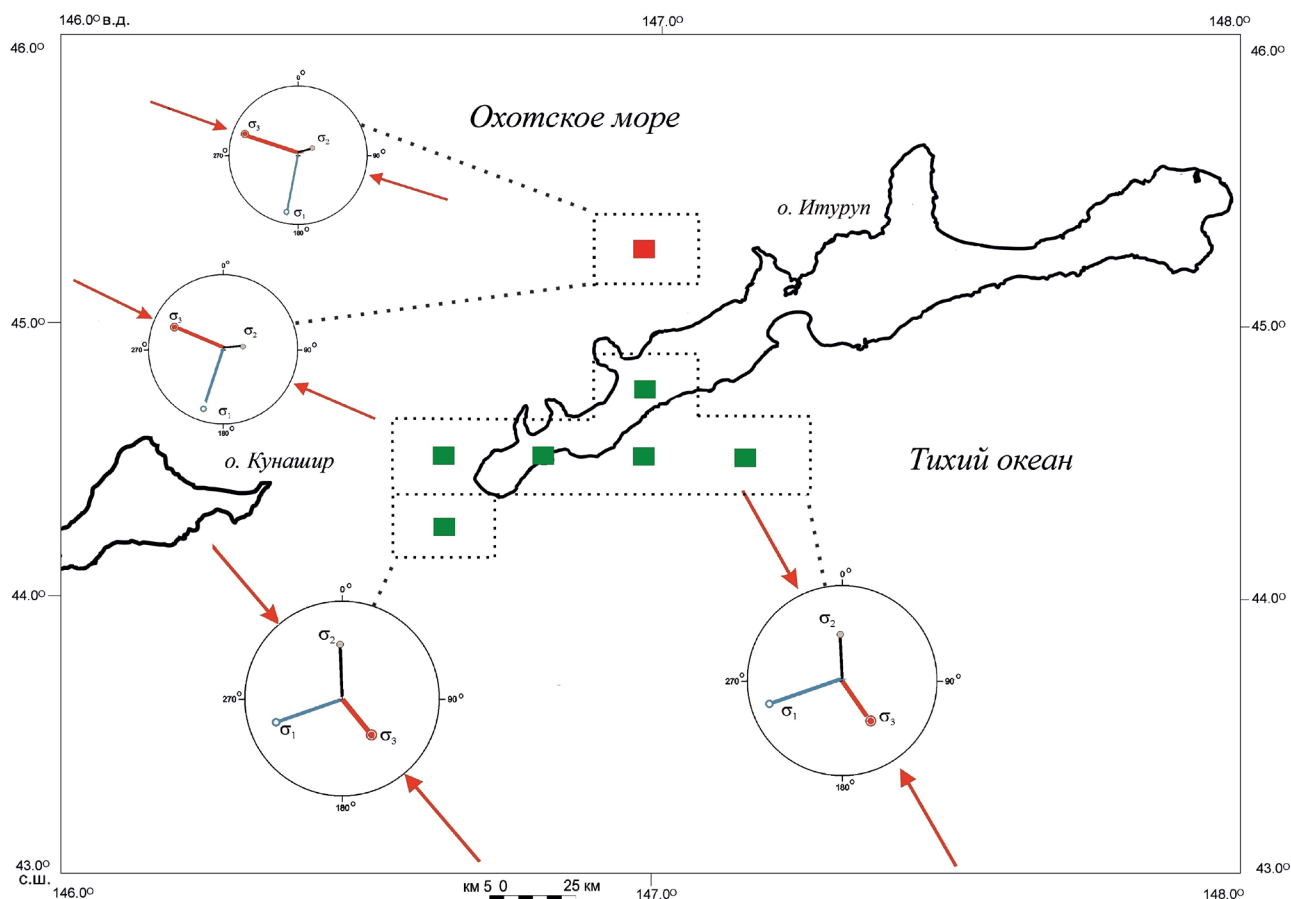


Рис. 4. Тектонофизическая реконструкция напряженного состояния коры о. Итуруп по методу МКА Ю.Л. Ребечко (Ребечкий, 2007). Красным цветом помечены стресс-состояния с геодинамическим типом напряженного состояния «горизонтальное сжатие со сдвигом», зеленым — с геодинамическим типом «горизонтальное растяжение со сдвигом». Для каждого стресс-состояния приведена стереограмма со стандартными обозначениями для главных осей тензора напряжений: σ_1 — ось минимального сжатия, σ_2 — промежуточная ось, σ_3 — ось максимального сжатия. Красными стрелками у стереограмм обозначена проекция оси σ_3 на горизонтальную плоскость.

Fig. 4. Tectonophysical reconstruction of the stressed state of the Iturup crust using the Rebetsky MCA method (Rebetsky, 2007). On the map, stress states with the geodynamic type of stress state «horizontal compression with shear» are marked in red, and those with the geodynamic type «horizontal extension with displacement» are marked in green. For each stress state, a stereogram is provided with standard notations for the principal axes of the stress tensor: σ_1 is the axis of minimum compression, σ_2 is the intermediate axis, σ_3 is the axis of maximum compression. The red arrows in the stereograms indicate the projection of the σ_3 axis onto the horizontal plane.

меньших плотностях островодужного комплекса в восточной части коры островной дуги (Thybo, Artemieva, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Для молодых породных массивов характерно развитие первичных трещин (литогенетических для осадочных пород и прототектонических для вулканических). Тектоническая трещиноватость усложняет первичную трещинную структуру толщ. В условиях плохой обнаженности конкретные складчато-разрывные нарушения, сопровождающиеся формированием тектонической трещиноватости, обычно наблюдаются

локально. Вероятно, по этой причине изучение трещиноватости вулканогенно-осадочных пород острова в период полевых работ 2019 г. не позволило сделать вывод об условиях формирования тектонической трещиноватости (Шалаева и др., 2021). Большинство выявленных трещин были отнесены к первичным (литогенетическим) в осадочных породах, и к прототектоническим в вулканиках. Результаты полевых работ 2022 г. показали достаточно широкое развитие тектонических трещин, в том числе, зеркал скольжения. Выполнены замеры трещиноватости вулканогенно-осадочных пород в центральной (вулканы Чирип, Баранского, бухта Черная, залив Касатка) и северной частях о. Итуруп (г. Медвежья) (рис. 1).

Гора Медвежья входит в состав вулканического хребта Медвежий, возникшего вдоль разлома северо-восточного простирания (Ермаков, Штейнберг, 1999). Замеры проведены в андезибазальтах на северо-восточном склоне горы (рис. 5).

Вулканогенно-осадочные толщи падают на юго-запад (угол падения 20–60°). Вдоль флюиальности развиты зеркала скольжения со смещением по падению–восстанию. Характерны зеркала скольжения сбросового типа северо-восточного падения (5 замеренных зеркал скольжения). Вдоль трещин северо-западной ориентировки выявлены левые сдвиги, по нарушениям северо-восточной ориентировки отмечаются как правые, так и левые сдвиговые нарушения. Практически по всем системам трещин выражено приоткрывание, что указывает на обстановку всестороннего растяжения. Сбросы отвечают условиям СВ растяжения. По сдвигам можно говорить о субширотном сжатии — субмеридиональном растяжении. Преобладание левых сдвигов позволяет предполагать проявление левосдвигового вращения.

Расчет по методу катакластического анализа дает решение с ССЗ простирания субгоризонтальной оси растяжения. При этом промежуточная ось и ось сжатия наклонены круто, что не противоречит сбросовому полю напряжений, параллельно выявленному структурно-парагенетическим методом (рис. 5). Тип поля напряжений — взрез.

Вулкан Баранского расположен в северо-восточной части хребта Грозного (Горшков, 1967). Это сложный стратовулкан высотой более 1 км и андезитовыми лавовыми потоками, спускающимися на 4–5 км преимущественно в юго-восточном и северо-западном направлениях в кальдере разрушенного вулкана (рис. 6). На дне кратера пологим щитом выражен темно-серый купол–пробка диаметром около 500 м и высотой 40–100 м. В северной части купола расположена вытянутая в северо-западном направлении цепочка небольших взрывных воронок. Замеры трещиноватости проведены в стенке кальдеры вулкана.

В данной точке наблюдения удалось зафиксировать большое количество зеркал скольжения и других кинематических индикаторов, что

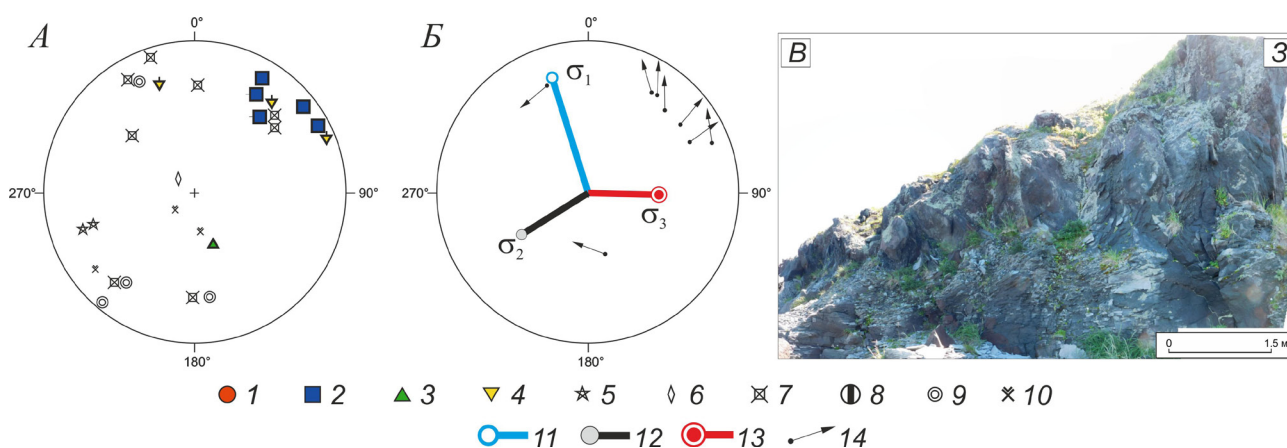


Рис. 5. Результаты структурно-кинематических наблюдений на участке «Вулкан Медвежий». Круговая диаграмма распределения плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа (А); положение осей главных напряжений, определенных методом катакластического анализа разрывных нарушений (Б). На фото: прибрежные выходы андезибазальтов на северо-восточном склоне г. Медвежья. 1–9 — полюса плоскостей геологических стресс-индикаторов: 1–6 — зеркала скольжения: 1 — взбросовые, 2 — сбросовые, 3 — правосдвиговые, 4 — левосдвиговые, 5 — неопределенной кинематики с вертикальным смещением, 6 — неопределенной кинематики со сдвиговым смещением; 7 — отрывы, 8 — дайки, 9 — зоны дробления; 10 — элементы залегания сланцеватости; 11–13 — оси главных напряжений: 11 — максимального растяжения, 12 — промежуточная ось, 13 — максимального сжатия; 14 — направление относительного перемещения висячего блока, показанное в полюсе к плоскости зеркала скольжения. Полюса нарушений и выходы тектодинамических осей показаны на верхней полусфере.

Fig. 5. Results of structural-kinematic observations at the Mount Medvezhya site. Circular diagram of the distribution of tectonic fracture planes of different kinematic types (A); position of the principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis of faults. In the photo: coastal outcrops of andesite-basaltic on the north-eastern slope of Mount Medvezhya (B). 1–9 — poles of geological stress indicator planes: 1–6 — slickenside: 1 — reverse fault, 2 — normal fault, 3 — right shear, 4 — left shear, 5 — uncertain kinematics with vertical displacement, 6 — uncertain kinematics with shear displacement; 7 — tension gash, 8 — dikes, 9 — crushing zones; 10 — elements of schistosity occurrence; 11–13 — axes of principal stresses: 11 — maximum tension, 12 — intermediate axis, 13 — maximum compression; 14 — direction of relative movement of the hanging block, shown at the pole to the plane of the sliding mirror. The poles of the faults and the exits of the tectodynamic axes are shown on the upper hemisphere.

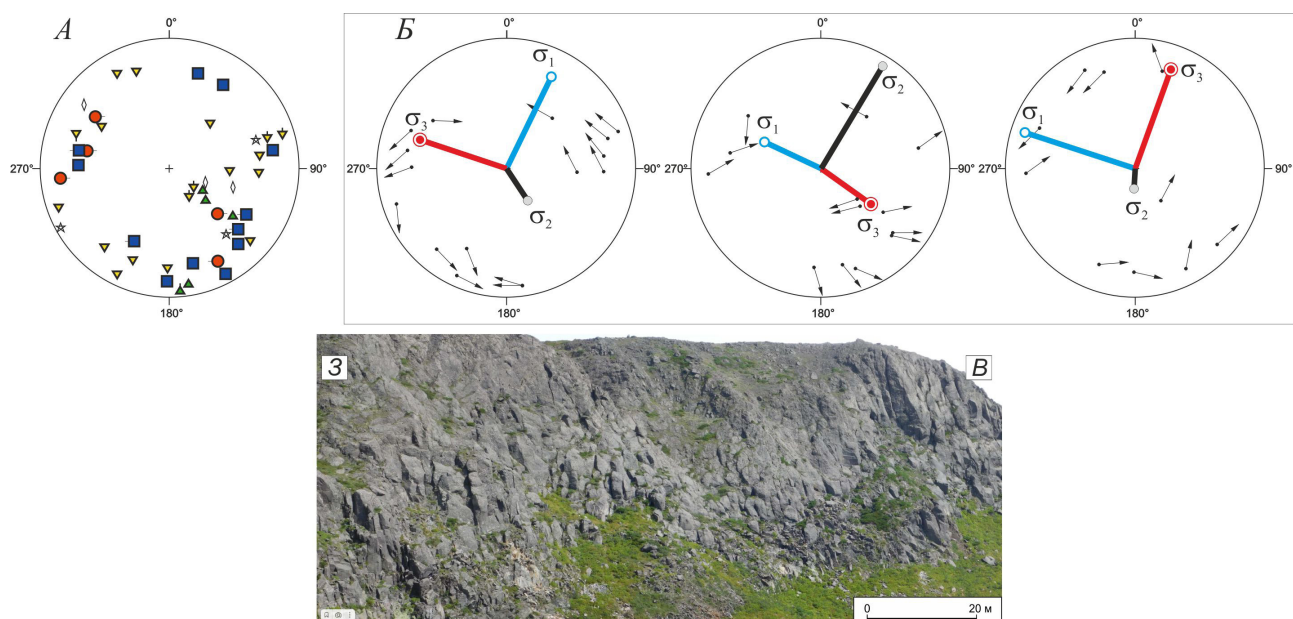


Рис. 6. Результаты структурно-кинематических наблюдений на участке «Вулкан Баранского». Круговая диаграмма распределения плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа (А); положение осей главных напряжений, определенных методом катакластического анализа разрывных нарушений (Б). На фото: скальные выходы андезибазальтов в стенке кальдеры вулкана. Условные обозначения см. на рис. 5.

Fig. 6. Results of structural-kinematic observations at the Baransky Volcano site. Circular diagram of the distribution of planes of tectonic cracks of different kinematic types (A); position of the axes of the main stresses determined by the method of cataclastic analysis of faults. In the photo: rocky outcrops of andesite-basaltic in the wall of the volcano's caldera (B). For legend, see Fig. 5.

позволило получить информацию о проявлении здесь нескольких тектодинамических обстановок. При пологом залегании вулканогенных толщ характерны различно ориентированные крутопадающие трещины, вероятно, в основе своей прототектонические, свидетельствующие о разноориентированном растяжении покрова. Среди зафиксированных зеркал скольжения присутствуют сбросы и, в меньшей степени, взбросы, а также разнонаправленные сдвиги с некоторым преобладанием левых.

Большой периферийный пояс сбросовых зеркал скольжения отвечает условиям всестороннего растяжения, как и первичных трещин отрывного типа. Наличие сдвиговых и взбросовых зеркал скольжения указывает на проявление полей напряжений с северо-западным сжатием (по взбросам северо-восточной ориентировки) и существенную сдвиговую деформацию.

Катакластический метод позволил выявить три этапа деформирования вулкаников. Максимальное число зеркал скольжения, как и по результатам структурно-парагенетического анализа, отвечает условиям горизонтального северо-западного сжатия и северо-восточного растяжения при сдвиговом типе напряженного состояния. Кроме этого, получены решения, указывающие на северо-западное растяжение, сопровождающееся либо северо-восточным лате-

ральным, либо субвертикальным сжатием. Типы выявленных полей напряжений — взрез и сдвиг.

Чирип — голоценовый стратовулкан в северной части Двугорбого хребта (южная часть хребта — вулкан Богдан Хмельницкий) на севере п-ва Чирип, сложенный андезитами и андезибазальтами. Западные склоны крутые и обрывистые высотой 500–600 м. В настоящее время фиксируется фумарольная и термальная активность. Замеры проведены в одном из ущелистых притоков р. Северный Чирип (рис. 7).

Падение флюидальности вулкаников пологое, на ЗСЗ. В точке наблюдения выявлены редкие зеркала скольжения — взбросы и левые сдвиги ССВ ориентировки (поперек предполагаемого направления потока) и правые сдвиги субширотного простирания (вдоль предполагаемого направления потока). Структурно-парагенетический анализ указывает на реализацию субширотного — СЗ сжатия и субмеридионального — СВ растяжения. Катакластический анализ дает сходные решения о СЗ субгоризонтальном сжатии и СВ субгоризонтальном растяжении при сдвиговом типе поля напряжений.

Описанные точки наблюдений относятся к четвертичным вулканическим постройкам. Помимо этого, удалось изучить особенности распределения трещиноватости и в неогеновом цоколе этих построек: в районе перешейка

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

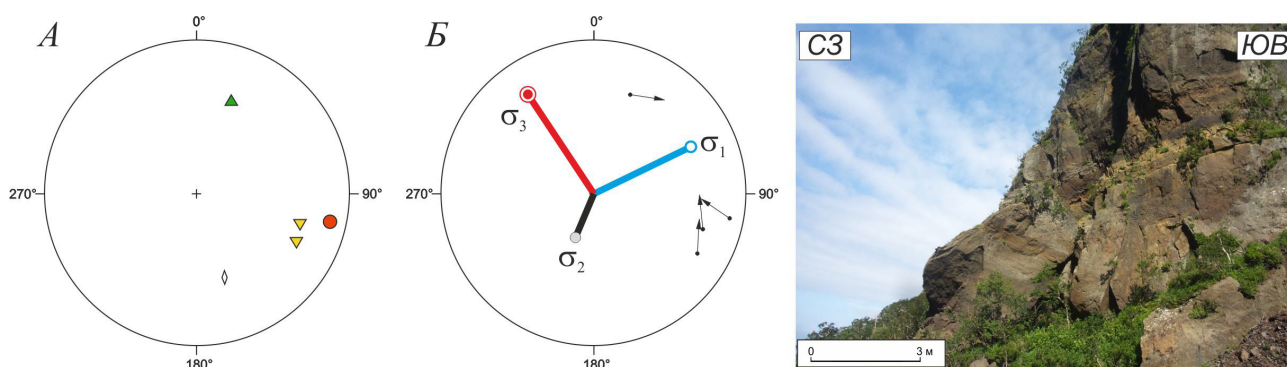


Рис. 7. Результаты структурно-кинематических наблюдений на участке «Вулкан Чирип». Круговая диаграмма распределения плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа (А); положение осей главных напряжений, определенных методом катакластического анализа разрывных нарушений (Б). На фото: выходы андезитов на северных склонах вулкана. Условные обозначения см. на рис. 5.

Fig. 7. Results of structural-kinematic observations at the Chirip Volcano site. Circular diagram of the distribution of tectonic fracture planes of different kinematic types (A); position of the principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis of faults. In the photo: andesite outcrops on the northern slopes of the volcano (B). For legend, see Fig. 5.

Осеннего на северо-западном побережье Итуруп (бухта Черная) и на юго-восточном (залив Касатка) (рис. 1).

Бухта черная расположена на Охотоморском побережье о. Итуруп в пределах Центральной вулканической группы (рис. 1). В клифе высотой до 70 м обнажаются гиалокластитовые туфобрекчии рыбаковской свиты, прорванные дайками и силлами андезитобазальтового состава (рис. 8). Замеры трещиноватости сделаны в субвулканических образованиях.

Субвулканические тела имеют мощность 0.2–1.5 м. Они образуют систему с тел в основном северо-западного простирания с падением на северо-восток (азимут падения 40–70, угол падения 60–80°). Ориентировка субвулканических тел отвечает условиям северо-восточного растяжения.

Основные системы трещиноватости поперечны субвулканическим телам, по ним выражены видимые смещения отдельных ветвей тел, с этими же направлениями связаны установленные смещения сбросового, взбросового и сдвигового типов. Выявленные зеркала скольжения — более 20 замеров на четырех точках (рис. 8А) отвечают условиям СЗ сжатия — СВ растяжения.

С помощью метода катакластического анализа получено два локальных стресс-состояния. Одно из них также указывает на СЗ сжатие и СВ растяжение при сдвиговом типе поля напряжений, другое указывает на проявление субмеридионального (ССВ) сжатия — субширотного (ЗСЗ) растяжения. Тип поля напряжений — горизонтальный сдвиг и растяжение.

Вторым местом, где проведены замеры трещиноватости в неогеновом цоколе четвертичных вулканических построек, является залив Касатка (рис. 1). Здесь на побережье развита неогеновая рыбаковская свита, сложенная толщей вулка-

ногенно-осадочных песчанистых отложений с прослоями пиллоу-базальтов с гиалокластитами и диатомитами. В отличие от северо-западного побережья здесь не зафиксированы субвулканические дайки и силлы. Сделано 10 замеров тектонических нарушений в борту долины ручья, впадающего в залив. Породы сильно изменены и сцементированы.

При субгоризонтальном залегании слоистости в вулканогенно-осадочных толщах установлены крутопадающие сбросы СЗ ориентировки с падением в противоположных направлениях, а также зафиксированы крутопадающие субмеридиональные сбросы и взбросы, и единичные левые сдвиги, а также редкие правые сдвиги субширотной ориентировки. Большинство зафиксированных зеркал скольжения формировались в условиях СЗ сжатия — СВ растяжения. Решение по катакластическому методу соответствует выводам парагенетического анализа. Тип поля напряжений — растяжение.

Анализ данных трещиноватости и стресс-состояний в местах изученных объектов. Полученные данные по трещиноватости и ее кинематическим особенностям вулканических и вулканогенно-осадочных пород достаточно устойчивы, хотя и неоднородны. При сравнении диаграмм в результатах можно заметить некоторые различия между трещинными структурами разрушений в вулканитах четвертичных вулканов (г. Медвежья (рис. 5), вул. Баранского (рис. 6), вул. Чирип (рис. 7)) и в неогеновых вулканогенно-осадочных толщах цоколя этих вулканов (рис. 8, точки наблюдения «бухта Черная»; рис. 9, точки наблюдения «залив Касатка»).

Ориентировка трещиноватости. В лавах четвертичных вулканических построек устанавливается различно ориентированная трещинова-

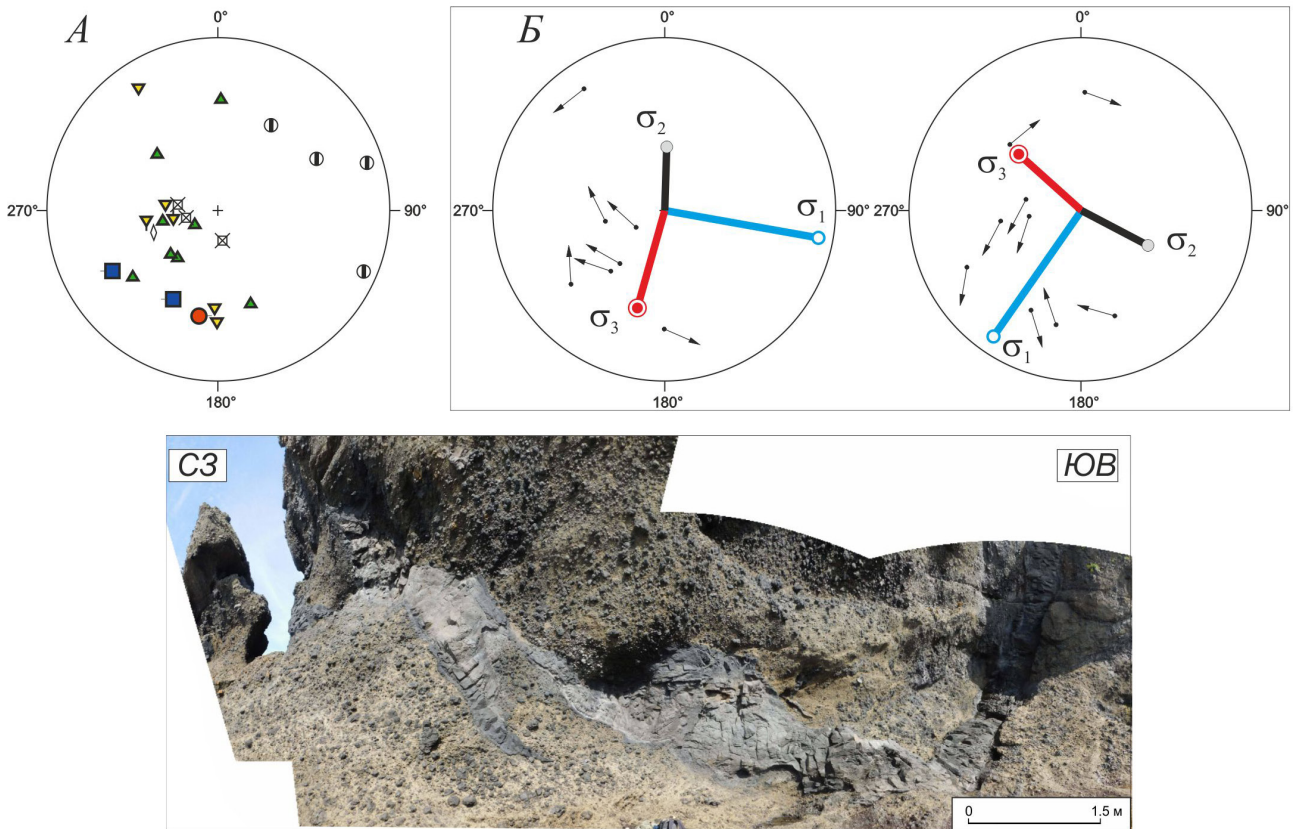


Рис. 8. Результаты структурно-кинематических наблюдений на участке «Бухта Черная». Круговая диаграмма распределения плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа (А); положение осей главных напряжений, определенных методом катакlastического анализа разрывных нарушений (Б). На фото: дайки и силлы андезибазальтов в гиалокластитах рыбаковской свиты на берегу бухты Черная. Условные обозначения см. на рис. 5.

Fig. 8. Results of structural-kinematic observations at the Chernaya Bay site. Circular diagram of the distribution of tectonic fracture planes of different kinematic types (A); position of the principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis of faults. In the photo: dykes and sills of andesite-basaltic in hyaloclastites of the Rybakovskaya suite on the shore of Chernaya Bay (B). For legend, see Fig. 5.

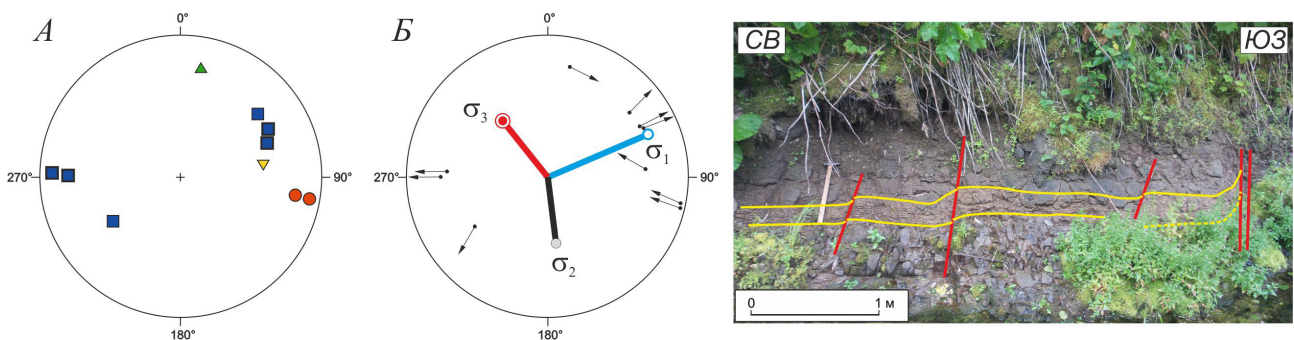


Рис. 9. Результаты структурно-кинематических наблюдений на участке «Залив Касатка». Круговая диаграмма распределения плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа (А); положение осей главных напряжений, определенных методом катакlastического анализа разрывных нарушений (Б). На фото: система сбросов в неогеновых осадочных отложениях; желтыми линиями показаны кровля и подошва прослоя песчаников, маркирующего смещения, красными линиями — разрывные нарушения. Условные обозначения см. на рис. 5.

Fig. 9. Results of structural-kinematic observations in the Kasatka Bay area. Circular diagram of the distribution of tectonic fracture planes of different kinematic types (A); B. Position of the principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis of faults. In the photo: fault system in Neogene sedimentary deposits; yellow lines show the roof and base of the sandstone interlayer marking the displacements, red lines show faults (B). For legend, see Fig. 5.

тость, являющаяся в своей основе прототектонической, но вместе с тем, главными ее системами являются трещины СВ и СЗ простирания, ориентированные вдоль и поперек острова (рис. 6–9). В вулканогенно-осадочных толщах неогенового цоколя на первый план выступает имеющая значительный разброс система трещин северо-западной ориентировки.

Повсеместное присутствие трещин СЗ простирания в структуре острова соответствует картируемым поперечным разрывам, вдоль которых заложены многочисленные речные системы и дешифрируются линеаменты. Характерное для четвертичных вулканических построек преобладание систем трещиноватости северо-восточного и северо-северо-восточного простирания указывает на то, что при их формировании значительную роль играли условия СЗ и ЗСЗ растяжения (поперечного к цепочкам вулканов).

Результаты структурно-парагенетического анализа. Региональные поля напряжений связаны с общим структурным планом Итурупа. Лучше всего повсеместно выражена обстановка СЗ сжатия и СВ растяжения в сдвиговом поле напряжений, что соответствует региональному напряженному состоянию южной части БКГ. Наряду с главной тектодинамической обстановкой, в кинематических особенностях трещиноватости проявлены и другие поля напряжений, связанные с развитием вулканических построек. Они отражены в присутствии в вулканиках разно-ориентированных структур растяжения, а также поясов трещиноватости, включающих структуры разного направления при закономерном изменении их кинематических особенностей. Это пояса тектодинамического вращения (вращение главной кинематической плоскости вокруг промежуточной оси) или течения (смещения в направлении оси растяжения).

Результаты катакластического анализа. Как и по результатам структурно-парагенетического анализа, катакластическим методом и в четвертичных вулканических постройках, и в их неогеновом вулканогенно-осадочном цоколе выявляется обстановка преимущественного поперечного острова сжатия и поперечного растяжения при преимущественно сдвиговом поле напряжений (рис. 10). Наряду с этим выявляются также дополнительные обстановки деформирования (по вулкану Баранского) с типом поля напряжений горизонтальный сдвиг и взрез.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование Итурупа связано с субдукционными процессами на Тихоокеанской окраине.

Неоген-четвертичный вулканизм развивается в условиях поддвига океанической коры под континентальную. Это доказывается геологическими (Ермаков и др., 1989) и сейсмическими (Thybo, Artemieva, 2013) данными.

Континентальная кора Курильской островной дуги испытывает растяжение вдоль простирания дуги с формированием вулканических и субвулканических построек.

Расположение вулканических построек как в пределах всей южной части Большой Курильской гряды, так и непосредственно на самом Итурупе, указывают, что их формирование происходило с проявлением растяжения в системах СВ и ССВ простирания при реализации левосдвиговой деформации вдоль субдукционной системы.

Это выражено в правокулисном расположении о-вов Кунашир, Итуруп и Уруп в зоне СВ простирания, а также в аналогичном расположении четвертичных вулканических построек на о. Итуруп, следовательно, главное растяжение при формировании вулканических поясов в надвиговом (висячем) крыле зоны субдукции было ориентировано в субширотном направлении, поперек зоны субдукции. Вместе с тем геологическое строение о. Итуруп указывает, что структура неогеновых вулканогенно-осадочных толщ формировалась в условиях субширотного сжатия, определившего наличие в неогеновых толщах пологих складчатых структур и взбросовых разрывных нарушений СВ ориентировки и сбросо-сдвиговых зон северо-западного простирания.

На деформированном неогеновом цоколе несогласно залегают четвертичные вулканики, что указывает на обстановку субширотного растяжения с элементом левого сдвига вдоль острова.

Изучение кинематической трещиноватости вулканических построек и их цоколя показало, что главным полем напряжений при ее формировании были условия СЗ сжатия, наряду с которыми проявлялись и другие обстановки, связанные с развитием конкретных локальных структур.

Полученные при изучении трещиноватости неогеновых и четвертичных вулкаников стресс-состояния указывают на периодическую смену напряженного состояния с изменением направления осей максимального и минимального напряжений на противоположные.

Формирование зон вулканических построек происходит при реализации растяжения в поперечном им направлении, что может быть связано с растяжением в надсубдукционном блоке. Вслед за растяжением поперек этих же зон могут возникать условия поперечного сжатия.

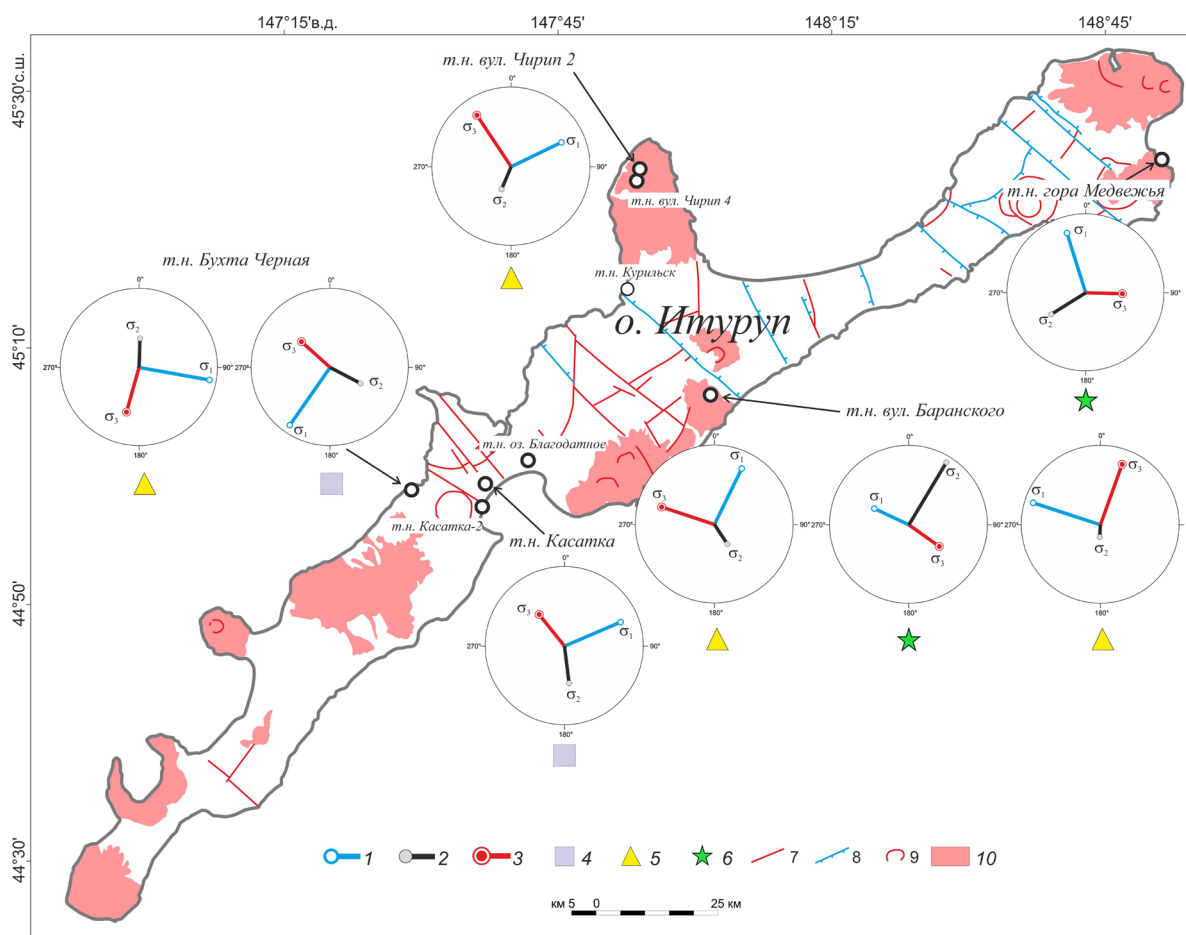


Рис. 10. Карта о. Итуруп с результатами реконструкций тектонических напряжений, полученных методом катакластического анализа разрывных смещений: 1–3 — главные оси нормальных тектонических напряжений: 1 — максимального растяжения, 2 — промежуточная ось, 3 — максимального сжатия; 4–6 — геодинамические типы напряженного состояния: 4 — горизонтального растяжения со сдвигом, 5 — горизонтального сдвига, 6 — сдвига в вертикальной плоскости (взрез); 7–9 — разрывные нарушения: 7 — неустановленной морфологии, 8 — сбросы, с указанием направления падения сместителя, 9 — разломы, ограничивающие вулcano-тектонические структуры; 10 — вулканические постройки.

Fig. 10. Map of Iturup Island with the results of tectonic stress reconstructions obtained by the method of cataclastic analysis of fault displacements: 1–3 — main axes of normal tectonic stresses: 1 — maximum extension, 2 — intermediate axis, 3 — maximum compression; 4–6 — geodynamic types of stress state: 4 — horizontal extension with shear, 5 — horizontal shear, 6 — shear in the vertical plane (incision); 7–9 — faults: 7 — of unknown morphology, 8 — normal faults, with indication of the direction of fault plane dip, 9 — faults limiting volcano-tectonic structures; 10 — volcanic edifices.

ВЫВОДЫ

По результатам реконструкций современного напряженного состояния и палеонапряжений методом катакластического анализа Ребецкого получены основные параметры поля напряжений коры Курильской дуги в районе о. Итуруп. Современное напряженное состояние характеризуется растяжением со сдвигом в юго-восточной, преддуговой части коры Южных Курил и сжатием со сдвигом в его северо-западной, задуговой части. Со стороны субдуцирующего слэба в островодужной коре проекция оси сжатия поперечна простиранию зоны субдукции, тогда как для коры фланга, примы-

кающего к задуговому бассейну, ось практически горизонтальна и повернута на 40–45° по часовой стрелке относительно простирания желоба, что, вероятно, указывает на правосдвиговую составляющую погружения тихоокеанской литосферы.

По данным тектонофизических и структурно-кинематических исследований напряженное состояние в висячем надвиговом крыле Курильской зоны субдукции при поддвиге тихоокеанской плиты в СЗ и субширотном направлении циклически изменялось. Неогеновые вулканогенно-осадочные толщи, образующие цоколь четвертичных вулканитов, формировались в зоне с субгоризонтальной ориентацией оси растяжения северо-восточного простирания, что указывает

на напряженное состояние с СЗ ориентировкой оси растяжения. Складчато-разрывная структура неогеновых толщ северо-восточного простирания формировалась в условиях СЗ сжатия. Четвертичные вулканические постройки концентрируются преимущественно в субмеридиональных зонах, что отражает обстановку субширотного растяжения. Выявленные по зеркалам скольжения в четвертичных вулканиках современные тектодинамические условия характеризуются СЗ и субширотным сжатием — СВ и субмеридиональным растяжением.

Работа выполнена в рамках госзадания Института физики Земли РАН.

Список литературы [References]

Атлас Курильских островов / Российская академия наук. Институт географии РАН. ТИГ ДВО РАН / под ред. Котлякова В.М., Бакланова П.Я., Комедчикова Н.Н. и др. Москва, Владивосток: ИПЦ «ДИК». 2009. 516 с. [Atlas Kuril'skikh ostrovov / Rossiyskaya akademiya nauk. Institut geografii RAN. TIG DVO RAN / pod red. Kotlyakova V.M., Baklanova P.Ya., Komedchikova N.N. i dr.; Moskva, Vladivostok: IPTS «DIK». 2009. 516 p. (in Russian)].

Бевз В.Е., Шапошников А.В. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200 000 (первое поколение). Серия Курильская. Лист L-55-XXVIII — о. Итуруп. Л.: Картфабрика ВСЕГЕИ. 1974. [Bevz V.Ye., Shaposhnikov A.V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1 : 200 000 (pervoye pokoleniye). Seriya Kuril'skaya. List L-55-XXVIII — o. Iturup. Leningrad: Kartfabrika VSEGEI. 1974. (in Russian)].

Витухин Д.И., Оreshkina Т.В., Пушчаровский Ю.М., Цуканов Н.В. Новые данные по геологии острова Итуруп (Курильская островная гряда) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1996. Т. 4. № 6. С. 61–74 [Vitukhin D.I., Oreshkina T.V., Pushcharovsky Yu.M., Tsukanov N.V. Novyye dannyye po geologii ostrova Iturup (Kuril'skaya ostrovnaya gryada) // Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya. 1996. T. 4. № 6. P. 61–74 (in Russian)].

Гаврилов А.А. Очаговые структуры Курильской островной дуги и dna прилегающих акваторий (по данным анализа визуализированной цифровой модели рельефа и материалов дистанционного зондирования из космоса) // Физика геосфер: Тринадцатый Всероссийский симпозиум, 11–15 сентября 2023 г., Владивосток, Россия: мат. докл. Вып. 2. ТОИ ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука. 2023. С. 162–166. <https://doi.org/10.34906/9785604968383>. [Gavrilov A.A. Ochagovyye struktury Kuril'skoy ostrovnoy dugi i dna prilgayushchikh akvatoriy (po dannym analiza vizualizirovannoy tsifrovoy modeli rel'yefa i materialov distantsionnogo zondirovaniya iz kosmosa) // Fizika geosfer: Trinadtsaty Vserossiskiye simpozium, 11–15 sentyabrya 2023 g., Vladivostok, Rossiya: mat. dokl. Vladivostok: Physics of Geospheres. Is. 2. 2023. POI FEB RAS P. 162–166 (in Russian)].

Геология СССР. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Ч. 1. Геологическое описание. М.: Недра, 1964. Т. 31. №1. 743 с. [Geologiya SSSR.

Kamchatka, Kuril'skiye i Komandorskiye ostrova. Chast' 1. Geologicheskoye opisaniye. Moscow: Nedra, 1964. V. 31. № 1. 743 p. (in Russian)].

Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 183 с. [Gorshkov G.S. Volcanism and Upper Mantle. Investigation in Kurile Island Arc System. Plenum Press, 1970. 400 p.].

Государственная геологическая карта РФ масштаба 1 : 200 000. Изд. 2-е. Серия Курильская. Листы L-55-XXII, XXVIII, XXXIV, XXIII, XXIX, XXXII, XXXIII, K-55-II. Объяснительная записка. Составители Ковтунович П.Ю. и др. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ. 2002. [Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF masshtaba 1 : 200 000. Izd. 2-ye. Seriya Kuril'skaya. Listy L-55-XXII, XXVIII, XXXIV, XXIII, XXIX, XXXII, XXXIII, K-55-II. Ob'yasnitel'naya zapiska. Sostaviteli Kovtunovich P.Yu. i dr. Saint-Petersburg: Kartfabrika VSEGEI. 2002. (in Russian)].

Ермаков В.А., Левынин А.И., Злобин Т.Н. Состав и строение земной коры и верхней мантии Курильских островов // Известия Ан СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 10. С. 18–37 [Ermakov V.A., Levynin A.I., Zlobin T.N. Sostav i stroyeniye zemnoy kory i verkhney mantii Kuril'skikh ostrovov // Izv. An SSSR. Ser. Fizika Zemli. 1989. № 10. P. 18–37 (in Russian)].

Ермаков В.А., Штейнберг Г.С. Вулкан Кудрявый и эволюция кальдеры Медвежья (о-в Итуруп, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1999. Т. 21. № 3. С. 19–40 [Ermakov V.A., Shteinberg G.S. Vulkan Kudryavyy i evolyutsiya kal'dery Medvezh'ya (o-v Iturup, Kuril'skiye ostrova) // Vulkanologiya i seysmologiya. 1999. T. 21. № 3. P. 19–40 (in Russian)].

Маруяма Ш., Сафонова Обут О.Т., Кривоногов С.К. и др. Геология и магматизм конвергентных окраин тихоокеанского типа. Новосибирск: ИПЦ НГУ. 2018. 96 с. [Maruyama SH., Safonova I.YU., Turkina O.M. et al. Geologiya i magmatizm konvergentnykh okrain tikhookeanskogo tipa. Novosibirsk: IPTS NGU. 2018. 96 p. (in Russian)].

Пискунов Б.Н. Вулканизм Большой Курильской гряды и петрология высокоглиноземистой серии. Новосибирск: Наука. 1975. 185 с. [Piskunov B.N. Vulkanizm Bol'shoi Kuril'skoy gryady i petrologiya vysokoglinozemistoy serii. Novosibirsk: Nauka. 1975. 185 p. (in Russian)].

Полец А.Ю., Злобин Т.К. Оценка напряженного состояния земной коры и верхней мантии в районе южных Курильских островов // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 2. С. 64–75 [Polets A.Yu., Zlobin T.K. Estimation of the stress state of the earth's crust and the upper mantle in the area of the southern Kuril islands // Russian Journal of Pacific Geology. 2014. V. 8. № 2. P. 126–137 (in Russian)].

Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Ю.М. Пушчаровский; Рос. АН, Дальневост. отд-ние, Ин-т вулкан. геологии и геохимии. М.: Наука, 1992. 527 с. [Podvodnyy vulkanizm i zonal'nost' Kuril'skoy ostrovnoy dugi / Otv. red. Yu.M. Pushcharovskiy; Ros. AN, Dal'nevost. otd-niye, In-t vulkan. geologii i geokhimii. Moscow: Nauka, 1992. 527 p. (in Russian)].

Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики

- тектонических процессов. Ч. 2. 1987. С. 173–235 [Rasczvetaev L.M. Parageneticheskiy metod strukturnogo analiza diz'yunktivnykh tektonicheskikh narusheniy // Problemy strukturnoy geologii i fiziki tektonicheskikh protsessov. Ch. 2. 1987. P. 173–235 (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с. [Rebetskiy Yu.L. Tektonicheskiye napryazheniya i prochnost' prirodnykh gornyykh massivov. Moscow: IKTS «Akademkniga». 2007. 406 p. (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние земной коры Курил и Камчатки перед Симуширскими землетрясениями // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 70–84 [Rebetskiy Yu.L. Stress state of the Earth's crust of the Kuriles and Kamchatka before the Simushir earthquakes // Russian Journal of Pacific Geology. 2009. V. 28. № 5. P. 70–84 (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние в афтершоковой области Землетрясения Тохoku 11.03.2011 // Вулканология и сейсмология. 2021. № 4. С. 22–44 [Rebetskiy Yu.L., Polets A.Y. The stresses in the aftershock area of the march 11, 2011 Tohoku earthquake // Journal of Volcanology and Seismology. 2021. V. 15. Is. 4. P. 236–257. <https://doi.org/10.1134/S0742046321040047>].
- Сергеев К.Ф. Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. 240 с. [Sergeyev K.F. Tektonika Kuril'skoy ostrovnoy sistemy. Moscow: Nauka, 1976. 240 p. (in Russian)].
- Шалаева Е.А., Бондарь И.В., Мягков Д.С. Научный отчет геологического отряда комплексной экспедиции «Восточный бастион – Курильская гряда» // Тезисы докладов IV Всероссийской научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы». Южно-Сахалинск. С. 61–61 [Shalayeva Ye.A., Bondar' I.V., Myagkov D.S. Nauchnyy otchet geologicheskogo otryada kompleksnoy ekspeditsii «Vostochnyy bastion – Kuril'skaya gryada» // Tezisy dokladov IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Geodinamicheskiye protsessy i prirodnyye katastrofy». Yuzhno-Sakhalinsk. P. 61–61 (in Russian)].
- Kurashimo E., Iwasaki T., Hirata N. et al. Crustal structure of the southwestern Kuril Arc sited in the eastern part of Hokkaido, Japan, inferred from seismic refraction // Reflection experiments. 2007. V. 59. P. 375–380.
- Nakanishi A., Kurashimo E., Tatsumi Y. Crustal evolution of the southwestern Kuril Arc, Hokkaido Japan, deduced from seismic velocity and geochemical structure // Tectonophysics. 2009. V. 472. P. 105–123. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.03.003>
- Nakanishi A., Smith A.J., Miura S. et al. Structural factors controlling the coseismic rupture zone of the 1973 Nemuro-Oki earthquake, the southern Kuril Trench seismogenic zone // Journal Geophysics Research 2004. 109 p. <https://doi.org/10.1029/2003JB002574>
- Safonov D.A. Tectonic stress field at intermediate depths of the southern flank of the Kuril-Kamchatka seismic zone // Geodynamics & Tectonophysics. 2021. V. 12. № 4. P. 929–950. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0564>.
- Thybo H., Artemieva I.M. Moho and magmatic underplating in continental lithosphere // Tectonophysics. 2013. V. 609. P. 605–619. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.032>

STRESS STATE OF THE EARTH'S CRUST OF THE KURIL ARC IN THE AREA OF ITURUP ISLAND BASED ON THE RESULTS OF TECTONOPHYSICAL RECONSTRUCTIONS

D.S. Myagkov¹, D.E. Beloborodov¹, I.V. Bondar¹, T.Yu. Tveretina^{1,2}

¹Schmidt institute of physics of the earth of the Russian academy of sciences, Moscow, Russia

²Department of Geology, Moscow State University, Moscow, Russia, 119991

Received February 21, 2024; revised May 01, 2025; accepted September 25, 2025

During two expeditions to Iturup Island (2019 and 2022), the late Alpine fracturing, including kinematic fracturing, of Quaternary volcanoes (Medvezhy, Chirip, Baransky) and Pliocene volcanogenic-sedimentary strata of the volcanic basement in the central part of the island was studied. The results of the fracturing analysis based on the paragenetic and cataclastic methods suggest that fracturing was formed under conditions of interference of regional and local stress fields. The regional field of paleostresses of the Neogene–Pleistocene is manifested in the structural plan of Iturup Island. It is dominated by a setting of the northwestern orientation of the main compression axis and the northeastern orientation of the extension axis under a shear stress field. Local paleostress fields are associated with the development of volcanic edifices — they are reflected in the presence of cracks in volcanics that form belts of tectodynamic rotation and flow. Also, the method of cataclastic analysis of rupture displacements was used to obtain data on the state of the modern stress field for the crust of Iturup Island. Stress states were identified for the northwestern part of the island with a stress state of the type «horizontal compression with shear», and stress states for the southeastern part with a stress state of «horizontal extension with shear».

Keywords: tectonophysics, stress state, method of cataclastic analysis, paleostress, fracturing.