

Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений)

© 2020 Л. А. Сим¹, П. А. Каменев^{*2}, Л. М. Богомолов²

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

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: p.kamenev@imgg.ru

Резюме. Для верификации представлений о неотектонических и современных напряжениях Сахалина анализируются структурно-геоморфологические признаки напряженного состояния этого региона, обнаруженные в ходе полевых работ 2019–2020 гг. Наряду с новыми полевыми замерами структурно-геоморфологическим методом представлены данные о деформации земной коры на основе GPS/ГЛОНАСС-измерений. Приводятся данные геофизических исследований (сейсмологических и скважинных методов). Подтверждено выделение трех типов областей с различной геодинамической обстановкой растяжения, сжатия и чистого сдвига. Отмечены вариации современного поля напряжений на границах областей с различной геодинамической обстановкой формирования новейших разломов. Северный Сахалин имеет специфические направления осей сжатия неотектонических напряжений, выраженные в северо-восточных ориентировках, в отличие от преобладающих субширотных ориентировок на всем острове. Проведенные исследования показали, что на юге Сахалина граница между Амурской и Охотской микроплитами проходит, скорее, по Западно-Сахалинскому, а не по Центрально-Сахалинскому разлому.

Ключевые слова: Сахалин, зона разлома, неотектоника, неотектонические и современные напряжения, борозды скольжения, будинаж, механизмы очагов землетрясений, геодинамический режим, граница Амурской и Охотской микроплит

New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress)

Lidia A. Sim¹, Pavel A. Kamenev^{*2}, Leonid M. Bogomolov²

¹Schmidt Institute of Earth Physics, RAS, Moscow, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*E-mail: p.kamenev@imgg.ru

Abstract. To verify the ideas about neotectonic and modern stresses of Sakhalin, we analyze structural and geomorphological signs of the stress state of this region, discovered during field work in 2019–2020. Along with updated field measurements using the structural-geomorphological method, data on crustal deformation based on GPS/GLONASS measurements are presented. Data from geophysical studies (seismological and borehole methods) are given. The identification of three types of areas with different geodynamic regime: transtension, transpression and strike – slip (simple shift) is confirmed. Variations of the current stress field at the boundaries of regions with different geodynamic regime for the formation of new faults are noted. Northern Sakhalin has specific directions of compression axes of neotectonic stresses, expressed in North-Eastern orientations, in contrast to the prevailing sublatitudinal orientations on the entire island. Studies have shown that in the south of Sakhalin, the border between the Amur and Okhotsk microplates runs along the West Sakhalin fault rather than the Central Sakhalin fault.

Keywords: the Sakhalin, fault zone, neotectonics, neotectonic and modern stresses, slickenlines, boudinage, focal mechanisms of earthquakes, geodynamic regime, Amur and Okhotsk microplates border

Для цитирования: Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М. Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений). *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с. 372–383. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>

For citation: Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M. New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 372–383. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>

Благодарности

Авторы благодарны А.О. Горбунову и В.А. Дегтяреву за помощь в проведении полевых работ, О.А. Жердевой за работу с графическим материалом. Отдельная благодарность А.В. Уба за проведение фотосъемки с БПЛА.

Acknowledgements

Authors are grateful to A.O. Gorbunov and V.A. Degterev for help in field works carrying out, O.A. Jerdeva for work with graphic material. Special thanks to A.V. Uba for taking photo with the drone.

Введение

Целью исследований является верификация полученных ранее результатов, т.е. повторная реконструкция неотектонических напряжений с помощью комплекса методов, и сравнение с имеющимися сейсмологическими и геофизическими данными для более полной характеристики напряженного состояния Сахалина. Это предполагает демонстрацию эффективных, но недостаточно используемых структурно-тектонифизических методов для изучения тектоники отдельных регионов и разработки модели напряженного состояния о. Сахалин. Данными методами охарактеризовано постмиоценовое напряженное состояние острова. Вместе с тем мы покажем, принимая во внимание данные о сейсмичности и GPS/ГЛОНАСС-измерения, что современное поле тектонических напряжений в земной коре Сахалина в основном унаследовано от распределения напряжений в постмиоценовое время.

Новейшее напряженное состояние острова и кинематические типы отдельных разломов исследовались различными тектонофизическими и структурными методами. Так, на северном и центральном Сахалине в районах развития почти сплошного чехла плиоцен-четвертичных отложений неотектонические напряжения восстанавливались структурно-геоморфологическим (СГ) методом реконструкции сдвиговых напряжений [Сим, 1991; Ребецкий и др., 2017], а на южном Сахалине – полевыми структурными и тектонофизическими методами, которые включали метод анализа сколовых сопряженных пар трещин [по Гзовскому, 1975], метод кинематического анализа трещинных структур разрушения [по Гущенко, 1979], метод поясов при исследовании тре-

циноватости, связанной с разрывными смещениями [по Даниловичу, 1961]. Кроме того, в 2019–2020 гг. авторами была уточнена схема неотектонических напряжений п-ова Шмидта – ориентировки оси сжатия в СВ направлении. С использованием БПЛА (беспилотного летательного аппарата) проведена съемка на морской террасе (осушенном бенче в южной части г. Невельск). Для проверки устойчивости ранее проведенной реконструкции локальных тектонических напряжений были выполнены дополнительные полевые измерения в 3 пунктах на территории южного Сахалина.

Для южного Сахалина восстановленные ориентации осей локальных стресс-состояний (ЛСС) дали возможность реконструировать единое региональное поле этой части острова по методике, изложенной в [Сим, 1982; Ребецкий и др., 2017].

Тектонофизические методы реконструкции напряжений: новые результаты

По топографическим картам масштаба 1:1 000 000 и космическим фотоснимкам структурно-геоморфологическим методом восстановлены тектонические напряжения северного и центрального Сахалина (рис. 1 А, С). Реконструкция тектонических напряжений заключается в дешифрировании линеаментов, возможных разломов и специальном дешифрировании мелких прямолинейных элементов рельефа, именуемых нами мегатрещинами. Если взаимные относительные ориентировки мегатрещин – две системы сколов и отрывы, ориентированные по биссектрисе между ними, соответствуют ориентации оперяющих трещин в зоне сдвига (при этом они имеют

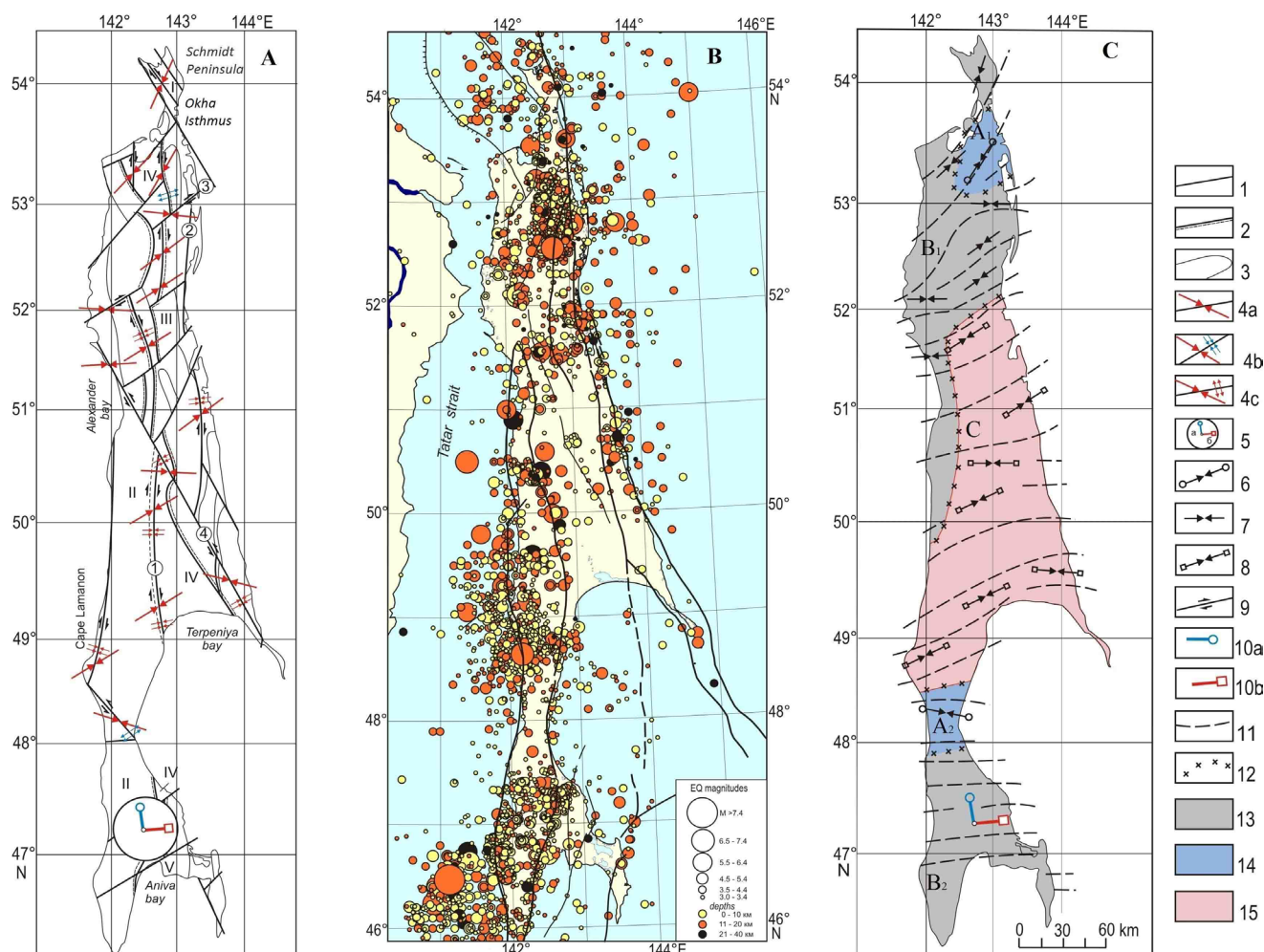


Рис. 1. Схемы новейшей геодинамики и сейсмичности (по материалам [Сим и др., 2016, 2017а]).

А – неотектонические структуры и оси главных нормальных напряжений. 1–3 – неотектонические структуры: 1 – разломы, выделенные по геоморфологическим данным, 2 – границы структур 1-го порядка, 3 – границы поднятий и впадин. Римскими цифрами обозначены поднятия: I – Шмидтовское, II – Западно-Сахалинское, III – Восточно-Сахалинское, V – Сусунайское; впадины: IV – Центрально-Сахалинская. Прочие обозначения: 4 – оси сжатия в горизонтальной плоскости на северном и центральном Сахалине, восстановленные СГ методом, сопровождаемые: 4a – трехосным напряженным состоянием, 4b – обстановкой дополнительного растяжения, 4c – обстановкой дополнительного сжатия; 5 – оси напряжений на южном Сахалине, восстановленные по банку данных о локальных стресс-состояниях (ЛСС): а – алгебраически минимальные, b – максимальные. Крупнейшие разломы (цифры в кружках): 1 – Центрально-Сахалинский, 2 – Хоккайдо-Сахалинский, 3 – Верхнепильтунский, 4 – Набильский.

В – линейно-доменная модель распределения сейсмичности Сахалина.

С – схема районирования областей с разной геодинамической обстановкой. 6–8 – оси сжатия, восстановленные СГ методом в разных геодинамических обстановках: 6 – дополнительного растяжения, 7 – трехосного напряженного состояния, 8 – дополнительного сжатия; 9 – сдвиги; 10 – оси главных нормальных напряжений, восстановленные методом нахождения общих полей напряжений по данным о ЛСС: 10a – растяжения, 10b – сжатия; 11 – траектории субгоризонтальных осей сжатия; 12 – границы областей с разной геодинамической обстановкой; 13 – области с обстановкой дополнительного растяжения*: A1 – Северная, A2 – Поясок; 14 – области с трехосным напряженным состоянием*: B1 – Западная, B2 – Южно-Сахалинская; 15 – области с обстановкой дополнительного сжатия: C – Центрально-Сахалинская.

Figure 1. Schemes of the latest geodynamics and seismicity (by materials of [Sim et al., 2016, 2017a]).

А – neotectonic structures and axes of principal normal stresses. 1–3 – neotectonic structures: 1 – faults identified according

*В работе [Сим и др., 2017а] в подписи к рис. 7, на котором была впервые приведена схема режимов новейшей геодинамики Сахалина, допущена опечатка в обозначении обстановки цветом: области A1 и A2 с обстановкой дополнительного растяжения должны быть обозначены голубым цветом, а области B1 и B2 с трехосным напряженным состоянием – серым (см. рис. 1 С в настоящей статье).

определенную ориентацию к плоскости разлома), то доказывается разломная природа линейaments. Далее определяются ориентации осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, знак сдвига (правый/левый) и геодинамическая обстановка формирования разлома (растяжения – сжатия). Нижний возрастной рубеж активности разлома определяется по возрасту молодых плиоцен-четвертичных отложений, которые развиты практически по всей исследуемой территории и разбиты мегатрещинами и новейшими разломами. Определения сдвиговых неотектонических напряжений по разломам, выделенным на структурно-геоморфологической карте, подтверждают справедливость проведения дизъюнктивов на основе анализа рельефа, а разная высота в противоположных крыльях разлома позволяет оценить вертикальную компоненту перемещений.

Стоит отметить, что одна из горизонтальных осей может быть промежуточной осью главных нормальных напряжений. Сдвиговые кинематические типы разломов напряжения согласуются с определениями кинематики разрывных нарушений, откартированных на северном Сахалине [Рождественский, 1982; Рождественский, 2008], а также с сейсмодислокациями, образовавшимися при Нефтегорском землетрясении 1995 г., $M_w = 7.0$ [Рогожин и др., 2002]. Восстановленные тектонические напряжения свидетельствуют о преимущественно субмеридиональном растяжении и субширотном сжатии на значительной части

острова; при продвижении на север ориентировка оси сжатия изменяется на северо-восточную (рис. 1 А, С). Разворот осей сжатия на северном Сахалине на северо-восток согласуется со схемой эллипсоида допозднемиоценовых деформаций всего Сахалина, приведенных в работе [Рождественский, 2008]. В этой же работе, по мнению ее автора, эллипсоид деформаций в плиоцен-четвертичное время развернулся, ось С, или ось укорочения, стала широтной, что привело к изменению кинематического типа сдвигов по продольным меридиональным разломам Сахалина на взбросо-надвиговый. Так как детальные исследования разновозрастных складчатых и разрывных структур В.С. Рождественского [Рождественский, 1982; Рождественский, 2008] относятся преимущественно к северному и центральному Сахалину, то можно допустить, что на южный Сахалин это изменение типа напряженного состояния не распространяется. Тем более что автор отмечает: «...правомерность применения эллипсоида напряжений неоднократно ставилась под сомнение...», но использование его имеет прикладное значение, «хотя наблюдаются аномальные структуры, трудно объяснимые с точки зрения этой теории» [Рождественский, 1997, с. 96].

В северной части Сахалина реконструкция неотектонических напряжений СГ методом на п-ове Шмидта позволила уточнить неотектоническое напряженное состояние полуострова. Западное побережье и самый север полуострова характеризуются сдвиговым полем

to the geomorphological data, 2 – boundaries of the first-order structures, 3 – boundaries of uplifts and depressions. Uplifts: I – Schmidt, II – Western Sakhalin, III – Eastern Sakhalin, V – Susunai; Depressions: IV – Central Sakhalin depression. Other designations: 4 – compression axes in the horizontal plane in Northern and Central Sakhalin (reconstruction by the method of structural geology), which is accompanied by: a – triaxial stress state, b – additional extension, c – additional compression; 5 – stress axes in Southern Sakhalin which were reconstructed using the database on the local stress state (LSS): (a) – algebraically minimal stresses, and (b) – maximal ones. Major faults (numbers in circles): 1 – Central Sakhalin, 2 – Hokkaido-Sakhalin, 3 – Verhnepiltunsky, 4 – Nabilsky.

B – The lineament domain model of seismicity distribution over Sakhalin area.

C – zoning scheme for regions with different geodynamic regime. 6–8 – compression axes reconstructed by the method of structural geology in different geodynamic conditions: 6 – additional extension, 7 – triaxial stress state, 8 – additional compression; 9 – strike-slip faults; 10 – axes of the principal normal stresses, reconstructed using the method of the total stress fields detection according to the data on LSS: 10a – extension, 10b – compression; 11 – trajectories of subhorizontal compression axes; 12 – boundaries of areas with different geodynamic conditions; 13 – areas with additional extension*: A1 – Northern, A2 – Poyasok; 14 – areas with triaxial stress state*: B1 – Western, B2 – Yuzhno-Sakhalinsk; 15 – areas with additional compression: C – Central-Sakhalin.

*In [Sim et al., 2017a], in the caption to Figure 7, where the diagram of the latest geodynamic regimes of Sakhalin was first presented, there was a misprint in the designation of the conditions with color: the A1 and A2 areas with conditions of additional tension should be highlighted in blue, and the B1 and B2 areas with a triaxial stress state should be gray (see Fig. 1C in present article).

напряжений с субмеридиональной ориентацией оси сжатия, а на восточной части восстановлены ориентации оси сжатия северо-восточного простирания. На Охинском перешейке восстановлены субширотные ориентации оси сжатия, характерные для всей остальной части Сахалина.

Интерпретация полученных данных следующая. При субширотном сжатии, унаследованном от сахалинской фазы складчатости, и меридиональном растяжении образовались перешейки Поясок и Охинский (рис. 1 А, С). Резкое изменение ориентировки оси сжатия на меридиональное на западе и севере п-ова Шмидта произошло предположительно в четвертичное время. Следствием этого явилось образование Амурского лимана и отчленение прараула Амура, дельтовые отложения которого картируются на п-ове Шмидта. Изменение поля напряжения затронуло и север п-ова Шмидта, на котором также определены меридиональные ориентации оси сжатия и субширотные – оси растяжения. Предположительно это связано с развитием впадины Дерюгина в плиоцен-четвертичное время, вызвавшим субширотное растяжение.

Комплексом полевых методов на южном Сахалине и южной части центрального Сахалина ранее был определен набор 56 локальных стресс-состояний (ЛСС) и представлены их стереограммы [Сим и др., 2017а]. Сопоставление стереограмм (результата реконструкции локального поля тектонических напряжений) с упрощенной схемой геологического строения по [Голозубов и др., 2012] выявило значительный разброс осей главных нормальных напряжений локального уровня. Единое региональное поле напряжений этой части острова было восстановлено по методике, обоснованной в работах [Сим, 1991; Ребецкий и др., 2017]. Общее поле имеет следующие характеристики: ось растяжения $\sigma_1 - 350 \angle 10$, промежуточная ось $\sigma_2 - 112 \angle 66$, ось сжатия $\sigma_3 - 260 \angle 20$. В этом поле напряжений максимально активными являются крутопадающие левые сдвиги с азимутом падения $32 \angle 83$ и правые сдвиги с азимутом падения $125 \angle 68$ [Сим и др., 2017 а, b]. Более поздние полевые исследования дали возможность дополнить базу данных по локальным стресс-состояниям как на южном Сахалине, так и в южной части

центрального Сахалина, а также подтвердили устойчивость реконструкции ЛСС.

На основании неотектонических напряжений, реконструированных на северном и центральном Сахалине, произведено районирование областей с разной геодинамической обстановкой формирования разломов в новейший этап (рис. 1 С). На южном Сахалине показано общее поле напряжений этой части острова. Так как структурно-геоморфологический метод основан на закономерностях взаимной ориентировки оперяющих разломов в зоне сдвига, полученных также и по данным моделирования, то обстановка дополнительного растяжения или сжатия, установленная в каждом определенном случае, требует для объяснения причины ее возникновения специальных дополнительных исследований.

Для проверки устойчивости ранее проведенной реконструкции локальных тектонических напряжений в 2019–2020 гг. проведены повторные полевые измерения в 3 пунктах на территории южного Сахалина. Измерения подтвердили наличие локальных сбросовых и сдвиго-сбросовых ЛСС в Невельском районе (восточное крыло Западно-Сахалинского разлома). Кроме того, в точке с координатами $47^{\circ}01'51.0''$ N и $142^{\circ}30'00.4''$ E (в 9 км от с. Елочки по старохолмской дороге, пересекающей Центрально-Сахалинский разлом) были обнаружены ярко выраженные борозды скольжения (рис. 2). В этой точке обнажения породы красной свиты представлены переслаиванием туфопесчаников и алевролитов. На вставке показаны зеркала скольжения, образованные правым сдвигом, черной стрелкой отмечено направление движения крыльев разрывного нарушения. Большинство борозд скольжения сдвигового типа, что подтверждает общий вывод о доминировании сдвигового режима на южном Сахалине.

Рассматривая современную сейсмичность о. Сахалин, можно отметить, что на п-ове Шмидта она явно менее активна, чем южнее (рис. 1 В). В области растяжения, выделенной нами на рис. 1 С как область А1, очевидно понижение современной сейсмичности как по количеству, так и по магнитудам событий. Это косвенно подтверждает достоверность выделенных нами геодинамических обстановок на о-ве Сахалин, так как в обстановке рас-

тяжения сейсмичность должна быть ниже, чем в обстановке сжатия и трехосного напряженного состояния. Это видно по числу событий на перешейке Поясок и вблизи Охинского перешейка, где их заметно меньше, чем вокруг.

Наглядные признаки, подтверждающие субмеридиональное растяжение и субширотное сжатие, выявлены на новообразованной морской террасе в южной части г. Невельск. Эту террасу, возникшую в результате косейсмического поднятия морского дна при Невельском землетрясении 2.08.2007 г., $M = 6.2$ [Tikhonov, Kim, 2010], можно выделить особо среди объектов исследования. Поднятие земной поверхности достигало 1.2 м вблизи береговой линии. Новообразованная морская терраса (по существу, осушенный бенч, рис. 3) расположена на западном крыле Западно-Сахалинского разлома, на расстоянии 15–20 км от гипоцентра Невельского землетрясения.

Для получения высококачественных фотоснимков террасы и более качественной интерпретации данных в 2020 г. сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН был использован БПЛА DJI Mavic 2 pro. Съемка производилась с высоты 80 м. На фото (рис. 3) очень отчетливо отображается будинаж. Комбинация наземных фотографий и космоснимков, выполненная ранее [Сим и др., 2017с], не позволяла добиться такой степени детализации отображения этого геологического объекта.

В нижнемиоценовых расчлененных сланцах с прослоями кремнеземистых мергелей отчетливо выражены две системы сколовых трещин. По этим данным с помощью розы-диаграммы трещиноватости (рис. 4 С) восстановлено постмиоценовое поле сдвиговых напряжений с горизонтальными осями растяжения и сжатия. Для реконструкции напряжений использовался метод М. Гзовского [1975].

Будинаж в слое кремнеземистых мергелей (рис. 4), а также ориентация трещин отрыва внутри отдельных

будин (рис. 4 D) подтвердили со всей убедительностью, что ось растяжения горизонтальна и ее направление близко к направлению север–юг. Для оценки максимальной деформации растяжения были измерены длина и ширина каждой будины, а также расстояние между соседними будинами в направлении вытянутости (табл. 1).

Уровень деформации растяжения оценивался как отношение расстояния между соседними будинами к полусумме их длин. После усреднения получена оценка постмиоценовой деформации растяжения порядка 200 %. Таким образом, на новообразованной морской террасе (Невельском бенче) имеется несколько индикаторов локальных тектонических напряжений. В результате изучения деформаций геологическими методами, с помощью БПЛА и непосредственных геологических натурных измерений, было восстановлено постмиоценовое поле сдвиговых напряжений с горизонтальными осями растяжения и сжатия. При установке сети реперов по краям будин и промере расстояний с субмиллиметровой точностью этот пункт подходит для геодинамического мониторинга.

Восстановленное по полевым данным изучения индикаторов тектонических напряжений общее поле напряжений южного Сахалина



Рис. 2. Борозды скольжения в обнажениях Красноярской свиты K_2kr .

Figure 2. A slickensides on the outcrops of the Krasnoyarskaya formation K_2kr .



Рис. 3. Панорамное фото неveltского бенча с БПЛА DJI Mavic 2 pro. Фото А.В. Уба

Figure 3. Panoramic view of the Nevelsk bench from the DJI Mavic 2 pro drone. Photo by A.V. Uba

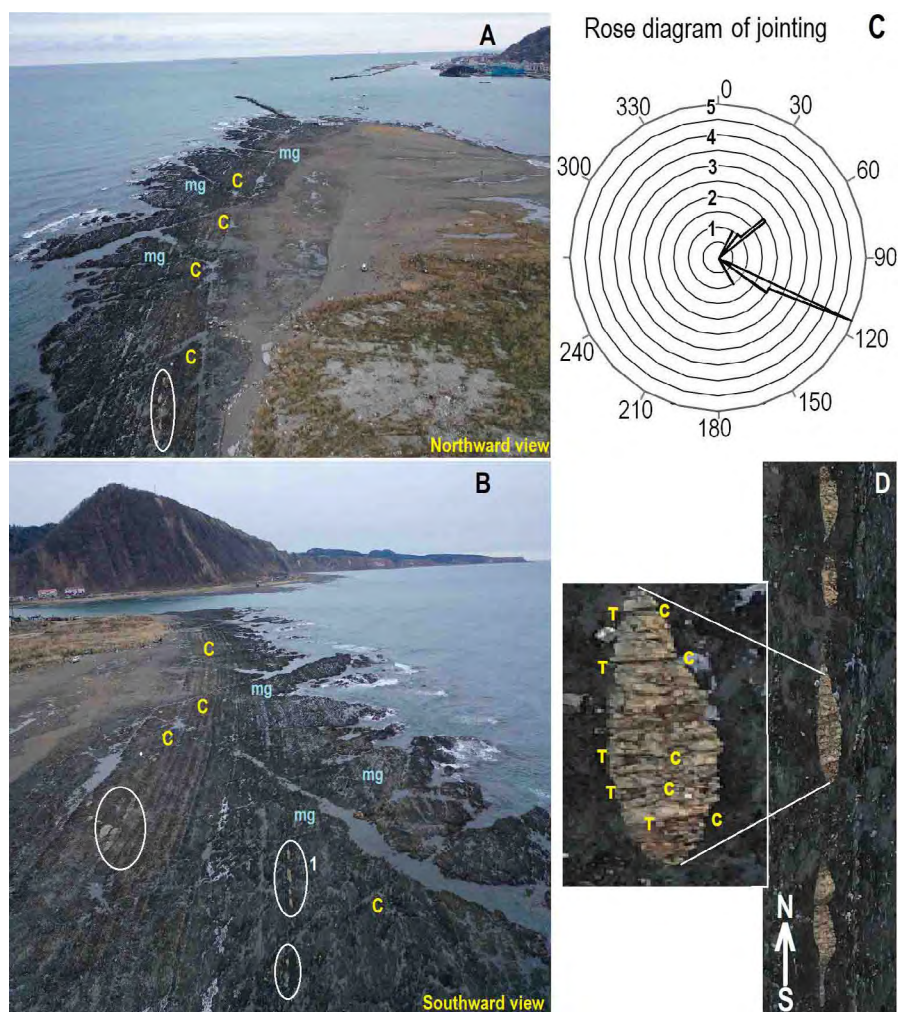
Таблица 1. Параметры будин на вновь образованной морской террасе и оценки деформаций растяжения

Table 1. The parameters of the boudins on the newly occurred marine terrace and the estimates of tensile strain

Будина	Длина, м	Ширина, м	Расстояние до следующей будины, м	Удлинение, %	Примечание
b1	3.8	0.55	3	69	1-я линия, 30 м восточней линии прибоя
b2	4.8	0.95	4.6	80	
b3	1.4	0.65	8.3	405	
b4	10.3	1	13.2	117	
b5	2.8	1.05	8.2	213	
b6	4.3	1.25	29.2	526	
b7	7.1	1.3	41	488	
b8	5.1	0.95	23.5	388	
b9	4.1	0.5	2.16	47	
Среднее по 1-й линии				259	
b10	2.16	0.65	2.2	78	2-я линия, 24 м восточнее 1-й
b11	1.4	0.35	0.7	40	
b12	1.3	0.35	7.4	448	
Среднее по 2-й линии				267	
b13	7.4	1.7	5.9	65	3-я линия, 23 м восточнее 2-й
b14	Раздробленная и частично в воде				
b15	1.3	0.92	1.5	68	4-я линия
b16	>1.6	Частично под водой			26 м от 3-й линии
Среднее				217	

Рис. 4. Индикаторы раннепостмиоценовых напряжений на новообразованной морской террасе (осушенном бенче в южной части г. Невельск). А – Вид на север; В – вид на юг; С – роза-диаграмма трещиноватости на поверхности террасы: ось сжатия, определяемая по биссектрисе между направлениями на максимумы по Гзовскому [1975], направлена по азимуту 92.5° , а ось растяжения – по азимуту 182.5° ; D – вид на четыре будины из первой линии (табл. 1) на осушенном бенче и детальный снимок одной из будин (1 на рис. 1 В). Относительное расположение будины, трех минифиордов (mg) и трещин отрыва (обозначены буквами Т–С) в будине b4 из табл. 1. На снимках А и В буквой с обозначены трещины скола.

Figure 4. Indicators of post-early Miocene stresses on the newly formed marine terrace (dried bench in the southern part of the town of Nevelsk). A – northward view; B – southward view; C – rose diagram of jointing on the surface of the terraces: the axis compression, defined by the bisector between the directions of the maxima by Gzovsky [1975], directed along the azimuth 92.5° , and the extension axes – bearing 182.5° ; D – view over four boudins from the first line (Tab. 1) on a drained bench, and detailed image of one of them (1 in Fig. 1B). The relative position of the boudin, three minigulfs (mg), and tension joints (indicated by the letters T–C) in the b4 boudin from the table 1. In images A and B, the letter c indicates the shear fractures.



представляет собой сдвиговый тип. Оно противоречит проведению границы между Амурской и Охотской плитами на южном Сахалине по Центрально-Сахалинскому разлому [Сим и др., 2016, 2017b]. Ориентация субгоризонтальной оси сжатия по всему Сахалину близка к широтной, это хорошо согласуется с данными других исследователей [Рождественский, 2008]. Исключение составляет северный Сахалин с северо-восточной ориентацией осей сжатия.

Сравнение результатов о постмиоценовых напряжениях с данными GPS/ГЛОНАСС-измерений и геофизических методов

Несомненный интерес представляет сравнение полученных данных об ориентации главных осей сжатия и растяжения с результатами

исследований деформации земной поверхности в окрестности активных разломов о. Сахалин по данным GPS/ГЛОНАСС-измерений. Согласно работе [Прытков, Василенко, 2018], геодинамические наблюдения на трех поперечных профилях (по северной, центральной и южной части о. Сахалин) дали исходную информацию о горизонтальных скоростях GPS-смещений и погрешностях их определения, что позволило оценить деформации земной поверхности о. Сахалин. Для расчетов использовался программный пакет GRID_STRAIN [Teza et al., 2008]. На рис. 5 показаны расположение пунктов GPS/ГЛОНАСС-измерений, векторы горизонтальных среднегодовых скоростей и результаты расчета горизонтальных деформаций поверхности в северной, центральной и южной частях о. Сахалин. Как видно из рис. 5 В, укорочение земной коры

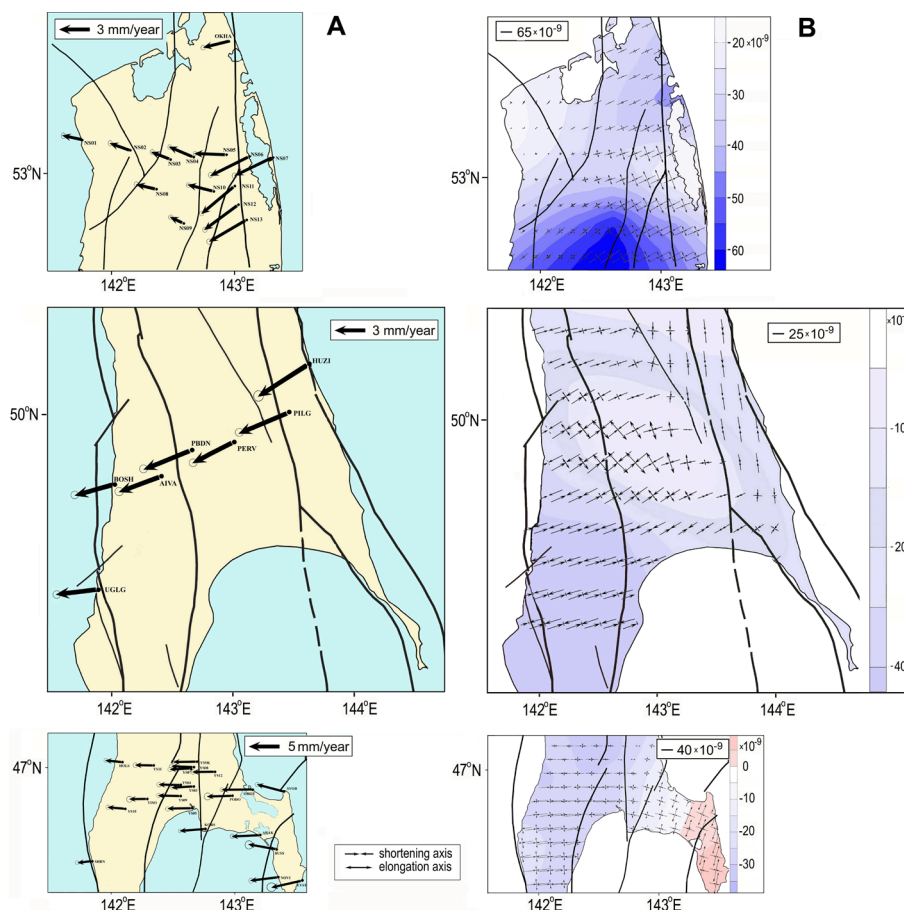


Рис. 5. Горизонтальные скорости в пунктах GPS/ГЛОНАСС-наблюдений о. Сахалин относительно Евразийской плиты (А), а также скорости дилатации и главных осей деформации земной поверхности (В). Верхняя часть – измерения в северной части Сахалина в 2003–2013 гг.; средняя – то же самое в центральной части в 2000–2011 гг.; нижняя часть – то же самое в южной части в 1999–2009 гг. По данным [Прытков, Василенко, 2018].

Figure 5. Horizontal velocities at the GPS observation points of Sakhalin Island in relation to the Eurasian plate (A), and velocities of dilatation and principal axes of earth surface deformation (B). Upper frame – the measurements in the northern part of Sakhalin during 2003–2013; mid frame – the same in the central part in 2000–2011; bottom frame – the same in the southern part in 1999–2009, according to [Prytkov, Vasilenko, 2018].

Сахалина происходит в основном в субширотном направлении, причем оно несколько меняется от района к району. Неоднородность поля поверхностной деформации проявляется в распределении по площади Сахалина главных осей удлинения и укорочения.

Территория северной части острова (рис. 5 В, верхняя часть) подвержена сжатию в юго-западном направлении. Максимальные скорости деформаций до 130×10^{-9} в год проявляются в восточной его части (рис. 5 В). Направления скоростей деформаций в целом согласуются с ориентировкой осей сжатия и растяжения в восстановленном поле неотектонических напряжений северного Сахалина (рис. 1 А) [Сим и др., 2017 а, б]. Однако GPS/ГЛОНАСС-измерениями не обнаружено области растяжения в этой части острова, в отличие от зоны растяжения севернее 53° с.ш. на рис. 1 А. Для центральной части острова характерны невысокие значения скоростей деформирования земной поверхности, не превышающие $\sim 50 \times 10^{-9}$ в год (рис. 5 В). Хоккайдо-Сахалинский разлом разграничивает территории с разной геодинамической обстановкой: на границе

разлома юго-западное направление осей сжатия сменяется субмеридиональной ориентацией.

В южной части о. Сахалин наряду с доминирующим субширотным сокращением, преобладающим на большей части территории, выделяется область растяжения, лежащая восточнее 143° в.д. (рис. 5 В, нижняя часть). Максимальная скорость деформации укорочения $\sim 80 \times 10^{-9}$ в год. В окрестности Центрально-Сахалинского разлома оси укорочения меняют свое западное направление на северо-западное, а преобладающим режимом деформирования становится растяжение северо-восточного направления. Эта зона не была выявлена при реконструкции неотектонических напряжений из-за недостаточного количества исходных данных для определения ЛСС.

В целом, полученные результаты о напряженно-деформированном состоянии земной коры Сахалина не противоречат результатам глобального проекта TheWorld Stress Map применительно к северо-западной части Тихоокеанского региона, т.е. окружению Сахалина [Heidbach et al., 2018]. В этом проекте учтены данные об очаговых механизмах сахалинских

землетрясений, отражающих распределение современных тектонических напряжений и деформаций. Хотя количество таких очаговых механизмов в работе [Heidbach et al., 2018] не велико: для территории Сахалина это порядка 30 определений, но полученная цитируемыми авторами карта с границей между Амурской и Охотской микроплитами представляет определенный интерес. В центральной части острова эта граница проходит вблизи Центрально-Сахалинского разлома (Тымь-Поронайского разлома), а на северном Сахалине она хорошо согласуется с расположением Верхнепильтунского и Набильского разломов. В южной же части острова эта граница проходит существенно западней Западно-Сахалинского разлома. Пространственное распределение афтершоков сильных землетрясений: Горнозаводского, 17.08.2006, $M = 5.9$, и Невельского, 2.08.2007, $M = 6.2$, произошедших вблизи Западно-Сахалинского разлома [Tikhonov, Kim, 2010], подтверждает, что этот разлом маркирует предполагаемую границу вдоль западного побережья Сахалина.

Детальный анализ механизмов очагов землетрясений, проведенный в обобщении [Heidbach et al., 2018], выявил преимущественно субширотное сжатие в ориентации современных тектонических напряжений, что соответствует представлениям региональных авторов.

Убедительным аргументом в пользу преобладания режимов горизонтального сжатия и сдвига являются результаты, полученные на основе данных бурения глубоких скважин на севере и юге Сахалина [Каменев и др., 2017]. В этой работе показано, что максимальное субширотное сжатие может превышать вертикальное напряжение в среднем в 1.2–4 раза как на севере, так и на юге Сахалина. Данные кавернометрии скважин также демонстрируют преобладание горизонтального напряжения (субширотного сжатия) над вертикальным. Во многих вертикальных скважинах северного и южного Сахалина стенки исследуемых скважин имеют выраженные обрушения в двух диаметрально противоположных угловых секторах, указывающих направление действия максимального сжатия–растяжения.

Таким образом, на субрегиональном масштабе (100 км и более) можно говорить о соответствии результатов, полученных с помощью разных методов: структурно-гео-

морфологического, геофизических (данные сейсмологии и каротажа глубоких скважин), а также GPS/ГЛОНАСС-измерений. Для зон с размерами порядка 30 км имеются различия, что определяется сложностью разломной структуры Сахалина, наличием множества локальных разрывов [Воейкова и др., 2008; Рождественский, 1982; Рождественский 2008; Жаров, 2004], а также временем действия (десяtkи лет) измеряемых современных движений, землетрясений, механизмы которых восстанавливаются за последние 40 лет, и временем формирования рельефа (менее 1.8 млн лет).

Выводы

На основе комплекса тектонофизических методов на Сахалине впервые проведено районирование областей с разной геодинамической обстановкой формирования новейших разломов. Границы этих областей сопровождаются изменчивостью параметров современного поля напряжений. Выборочная проверка ЛСС и новые данные по структурно-геоморфологическим индикаторам в ходе полевых и камеральных работ 2019–2020 гг. подтвердили устойчивость реконструкции ЛСС и схемы районирования Сахалина по геодинамической обстановке. Реконструкция новейших тектонических напряжений Сахалина выявила доминирование сдвигового типа напряженного состояния с субгоризонтальными осями сжатия и растяжения. Ось сжатия ориентирована субширотно, ось растяжения – субмеридионально. Субширотные оси сжатия, восстановленные на центральном и северном Сахалине структурно-геоморфологическим методом, разворачиваются на северо-восток. Рассчитанные параметры тектонических напряжений в целом находятся в соответствии с результатами, полученными по механизмам очагов землетрясений, скважинным данным и GPS/ГЛОНАСС-измерениям деформации поверхности Земли. Таким образом, нельзя говорить о смене сдвигового поля напряжений складчатого этапа на взбросовый на орогенном этапе.

Результаты работ показали неправомерность проведения границы между Амурской и Охотской микроплитами по Центрально-Сахалинскому разлому на южном Сахалине. Здесь она проходит, скорее, по Западно-Сахалинскому разлому.

Список литературы

1. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. **2007**. *Неотектоника и активные разломы Сахалина*. М.: Наука, 187 с.
2. Гзовский М.В. **1975**. *Основы тектонофизики*. М.: Наука, 535 с.
3. Голозубов В.В., Касаткин С.А., Гранник В.М., Нечаюк А.Е. **2012**. Деформации позднемеловых и кайнозойских комплексов Западно-Сахалинского террейна. *Геотектоника*, 5: 22–43.
4. Гущенко О.И. **1979**. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений. В кн.: *Поля напряжений в литосфере*. М.: Наука, 7–25.
5. Данилович В.Н. **1961**. *Метод поясов при исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями*. Иркутск: Педагогический институт Иркутского государственного университета, 47 с.
6. Жаров А.Е. **2004**. *Геологическое строение и мел-палеогеновая геодинамика юго-восточного Сахалина*. Южно-Сахалинск: Южно-Сахалинское кн. изд-во, 192 с.
7. Каменев П.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С. **2017**. О напряженном состоянии земной коры Сахалина по данным бурения глубоких скважин. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 29–38.
8. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. **2018**. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(2): 503–514. doi:10.5800/GT-2018-9-2-0358
9. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. **2017**. *От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы*. М.: ГЕОС, 234 с.
10. Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Бесстрашнов Б.М., Стром А.Л., Борисенко Л.С. **2002**. Сейсмотектоническая обстановка острова Сахалин. *Физика Земли*, 3: 1–10.
11. Рождественский В.С. **1982**. Роль сдвигов в формировании структуры о. Сахалин. *Геотектоника*, 4: 99–111.
12. Рождественский В.С. **1997**. Роль сдвигов в формировании структуры Сахалина, месторождений углеводородов и рудоносных зон. В кн.: *Геология и геодинамика Сихотэ-Алинской и Хоккайдо-Сахалинской складчатых областей* (ред. Б.Н. Пискунов). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 80–109.
13. Рождественский В.С. **2008**. Активный рифтинг в Японском и Охотском морях и тектоническая эволюция зоны Центрально-Сахалинского разлома в кайнозое. *Тихоокеанская геология*, 27(1): 17–28.
14. Сим Л.А. **1982**. Определение регионального поля по данным о локальных напряжениях на отдельных участках. *Известия вузов. Геология и разведка*, 4: 35–40.
15. Сим Л.А. **1991**. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации). *Известия вузов. Геология и разведка*, 10: 3–22.
16. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В. **2016**. О возможной границе между Амурской и Охотской микроплитами на Сахалине. В кн.: *Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докладов всероссийской конференции, Москва, 3–8 октября 2016 г.* М.: ИФЗ РАН, т. 1: 256–263.
17. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. **2017а**. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
18. Сим Л.А., Брянцева Г.В., Саввичев П.А., Каменев П.А. **2017б**. Особенности переходной зоны между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами (на примере напряженного состояния о-ва Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 1(1): 3–22. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.1.003-022
19. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Кучай О.А., Татаурова А.А. **2017с**. Неотектонические и современные напряжения юга Сахалина. *Тихоокеанская геология*, 36(3): 88–101.
20. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller K., Reinecker B., Reiter J., Tingay K., Wenzel F., Xie F., Ziegler M., Zoback M.L., Zoback M.D. **2018**. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
21. Seno T., Sakurai T., Stein S. **1996**. Can the Okhotsk Plate be discriminated from the North American plate? *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B5): 11305–11315. <http://dx.doi.org/10.1029/96JB00532>
22. Teza G., Pesci A., Galgaro A. **2008**. Grid strain and grid strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. *Computers & Geosciences*, 34(9): 1142–1153. doi:10.1016/j.cageo.2007.07.006
23. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2010**. Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevelsk earthquake (Sakhalin Island, Russia). *Tectonophysics*, 485(1–4): 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002>

References

1. Voeykova O.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I. **2007**. [*Neotectonics and active faults of Sakhalin*]. Moscow: Nauka, 187 p. (In Russ.).
2. Gzovsky M.V. **1975**. [*Fundamentals of Tectonophysics*]. Moscow: Nauka, 536 p. (In Russ.).
3. Golozubov V., Kasatkin S., Grannik V., Nechayuk A. **2012**. Deformation of the Upper Cretaceous and Cenozoic complexes of the West Sakhalin terrane. *Geotectonics*, 46: 333–351. doi:10.1134/S0016852112050020

4. Gushchenko O.I. **1979**. [The method of kinematic analysis of destruction structures in reconstruction of the tectonic stress fields]. In: *Polya napryazheniy v litosfere [Stress fields in the lithosphere]*. Moscow: Nauka, 7–25. (In Russ.).
5. Danilovich V.N. **1961**. *Metod poyasov pri issledovanii treshchinovatosti, svyazannoy s razryvnymi smeshcheniyami [The method of belts in studies of fracturing associated with shearing]*. Irkutsk: Pedagogicheskiy institut Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, 47 p. (In Russ.).
6. Zharov A.E. **2004**. *Geologicheskoe stroenie i mel-paleogenovaya geodinamika yugo-vostochnogo Sakhalina [Geology and Cretaceous-Paleogene geodynamics of southeastern Sakhalin]*. Yuzhno-Sakhalinsk: Yuzhno-Sakhalinsk Publ., 192 p. (In Russ.).
7. Kamenev P.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S. **2017**. On the stress state of the Sakhalin crust according to the data of drilling deep boreholes. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 25–33. doi:10.1134/S1819714017010043
8. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. **2018**. Earth surface deformation of the Sakhalin Island from GPS data. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(2): 503–514. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358>
9. Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. **2017**. *Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam. Metody i algoritmy [From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms]*. Moscow: GEOS, 234 p. (In Russ.).
10. Rogozhin E.A., Reisner G.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Borisenko L.S. **2002**. Seismotectonic settings of Sakhalin Island. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 38(3): 207–214.
11. Rozhdestvenskiy V.S. **1982**. The role of strike-slip in the structure of Sakhalin. *Geotectonics*, 16: 323–332.
12. Rozhdestvenskiy V.S. **1997**. [The role of strike-slips in formation of Sakhalin structure, hydrocarbon deposits and ore-bearing zones]. In.: *Geologiya i geodinamika Sikhote-Alinskoy i Khokkaydo-Sakhalinskoy skladchatykh oblastey [Geology and Geodynamics of the Sikhote-Alin and Hokkaido-Sakhalin folded regions]* (ed. B.N. Piskunov). Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN [IMGIG FEB RAS], 80–109.
13. Rozhdestvenskiy V.S. **2008**. Active rifting in the Japan and Okhotsk Seas and the tectonic evolution of the Central Sakhalin Fault zone in the Cenozoic. *Russian J. of Pacific Geology*, 2(1): 15–24.
14. Sim L.A. **1982**. [Determination of the regional field by the data on the local stresses in separate areas]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka [Geology and exploration]*, 4: 35–40.
15. Sim L.A. **1991**. [Studies of tectonic stresses based on geological indicators (methods, results, recommendations)]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka [Geology and exploration]*, 10: 3–22.
16. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V. **2016**. [On possible border between the Amur and Okhotsk microplates on Sakhalin]. In.: *Chetvertaya tektonofizicheskaya konferentsiya v IFZ RAN. Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle, Moscow, 3–8 Oct. 2016 [The 4th Tectonophysical conference in the IPE RAS. Tectonophysics and topical problems in Earth sciences, Moscow, 3–8 October, 2016]*. Moscow: IFZ RAN, vol. 1: 256–263.
17. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. **2017a**. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
18. Sim L.A., Bryantseva G.V., Savvichev P.A., Kamenev P.A. **2017b**. Patterns of transition zone between Eurasian and North American plates (by example of stressed state of the Sakhalin Island). *Geosistemy pererodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(1): 3–22. (In Russ.). doi:10.30730/2541-8912.2017.1.1.003-022
19. Sim L.A., Bogomolov L.M., Kuchai O.A., Tataurova A.A. **2017c**. Neotectonic and modern stresses of South Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 11(3): 223–235. <https://doi.org/10.1134/s1819714017030058>
20. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller K., Reinecker B., Reiter J., Tingay K., Wenzel F., Xie F., Ziegler M., Zoback M.L., Zoback M.D. **2018**. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
21. Seno T., Sakurai T., Stein S. **1996**. Can the Okhotsk Plate be discriminated from the North American plate? *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B5): 11305–11315. <http://dx.doi.org/10.1029/96JB00532>
22. Teza G., Pesci A., Galgaro A. **2008**. Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. *Computers & Geosciences*, 34(9): 1142–1153. doi:10.1016/j.cageo.2007.07.006
23. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2010**. Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevetsk earthquake (Sakhalin Island, Russia). *Tectonophysics*, 485(1–4): 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002>

Об авторах

СИМ Лидия Андреевна (ORCID 0000-0003-0267-2241), доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, sim@ifz.ru

КАМЕНЕВ Павел Александрович (ORCID 0000-0002-9934-5855), кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, p.kamenev@imgg.ru

БОГОМОЛОВ Леонид Михайлович (ORCID 0000-0002-9124-9797), доктор физико-математических наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, l.bogomolov@imgg.ru