© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.242.1:528.344

https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.rma-361
https://www.elibrary.ru/zlcdns
http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-0-361.pdf
Опубликована online 30.07.2025

Современные движения и деформации центральной части острова Сахалин

Н. Ф. Василенко[1], *А. С. Прытков*[1@], *Д. И. Фролов*[2], *А. С. Тен*[3]

[@]*E-mail: a.prytkov@imgg.ru*

[1] *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия*
[2] *Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия*

Резюме. На основе межсейсмических скоростей GNSS-пунктов детализированы горизонтальные деформации центральной части о. Сахалин. В районе исследований преобладают условия одноосного сжатия, однако пространственное распределение деформаций в окрестностях трансрегиональных литосферных разломов (Центрально-Сахалинского и Хоккайдо-Сахалинского) неоднородно. Максимальное сокращение земной поверхности СЗ-ЮВ направления происходит в зоне Хоккайдо-Сахалинского разлома. К зоне Центрально-Сахалинского разлома и его ближайшим окрестностям приурочена область интенсивных деформаций правостороннего сдвига и минимальных скоростей дилатации. Кинематика района в целом свидетельствует о сжатии островной суши со скоростью 2 мм/год и правостороннем сдвиге 2.5 мм/год, что соответствует современному тектоническому режиму региона. Правосторонний сдвиг в зоне Центрально-Сахалинского разлома (1 мм/год) подтверждает его кинематику по данным геолого-геоморфологических исследований. Признаки правостороннего сдвига в зоне Хоккайдо-Сахалинского разлома (~0.4 мм/год) проявляются только в пределах ошибок его определения. По данным GNSS-наблюдений получена первая оценка вековых вертикальных движений в районе исследований. Абсолютные вертикальные движения центральной части острова имеют унаследованный характер по отношению к новейшим структурам. Воздымания со скоростью ~3 мм/год проявляются в пределах Западно-Сахалинского и Восточно-Сахалинского поднятий. Небольшое опускание земной поверхности происходит в Тымь-Поронайском прогибе.

Ключевые слова: современная геодинамика, GNSS-наблюдения, деформации, остров Сахалин

Recent movements and deformations in Central Sakhalin

Nikolay F. Vasilenko[1], *Alexander S. Prytkov*[1@], *Dmitry I. Frolov*[2], *Alexander S. Ten*[3]

[@]*E-mail: a.prytkov@imgg.ru*

[1] *Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
[2] *Ioffe Physical-Technical Institute, RAS, Saint Petersburg, Russia*
[3] *Computing Center, FEB RAS, Khabarovsk, Russia*

Abstract. Based on the interseismic velocities of GNSS points, the horizontal deformations in Central Sakhalin were studied. The research area is characterized by the predominance of uniaxial compression conditions, however, the spatial distribution of deformations in the vicinity of the trans-regional lithospheric faults (Central-Sakhalin and Hokkaido-Sakhalin) is heterogeneous. The maximum reduction of the earth's surface in the NW-SE direction occurs in the Hokkaido-Sakhalin fault zone. The area of intensive deformations of right-lateral slip and minimal dilatation rates is confined to the Central Sakhalin fault zone and its nearest surroundings. Overall, the kinematics of the region indicate the compression of the island at the rate of 2 mm/year and the right-lateral slip of 2.5 mm/year, which corresponds to the recent tectonic regime of the region. The right-lateral slip in the Central Sakhalin fault zone (1 mm/year) confirms its kinematics according to geological and geomorphological studies. Signs of a right-lateral slip in the Hokkaido-Sakhalin fault zone (~0.4 mm/year) appear only within the limits of their determination errors. Based on GNSS observations,

the first estimates of secular vertical movements in the investigation area were obtained. The absolute vertical movements in Central Sakhalin are inherited in relation to neotectonic structures. West-Sakhalin and East-Sakhalin uplifts elevate at the rate of ~3 mm/year. A slight sinking of the earth's surface occurs in Tym-Poronaysk depression.

Keywords: recent geodynamics, GNSS observations, deformations, Sakhalin Island

Для цитирования: Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Тен А.С. Современные движения и деформации центральной части острова Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, 361. https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.rma-361; http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-0-361.pdf; https://www.elibrary.ru/zlcdns;

For citation: Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., Ten A.S. Recent movements and deformations in Central Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, 361. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.rma-361; http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-0-361.pdf

Введение

Остров Сахалин входит в число наиболее тектонически активных регионов России. Его геодинамика в свете современных представлений определяется конвергенцией Евразийской и Североамериканской (Охотской) литосферных плит. При всей неоднородности точек зрения на положение межплитовой границы большинство исследователей связывают ее с системой трансрегиональных субмеридиональных разломов острова: Хоккайдо-Сахалинского, Центрально-Сахалинского и Западно-Сахалинского [1–4] (рис. 1). Схождение литосферных плит проявляется в интенсивном неоднородном деформировании земной коры и высокой сейсмической активности региона [5].

В начале 2000-х годов на севере, в центральной части и юге острова были созданы региональные сети спутниковых GNSS (Global Navigation Satellite System) геодинамических наблюдений, представляющие собой поперечные профили, пересекающие островную сушу с запада на восток. По данным многолетних GNSS-наблюдений установлена скорость схождения и глубина механического сцепления литосферных плит, а также исследовано распределение горизонтальных деформаций в пределах островной суши [4, 6].

Первые инструментальные сведения о скоростях вертикальных движений неотектонических структур острова были обобщены в Карте современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин (далее – карта СВДЗК), составленной в конце 70-х годов прошлого столетия [7, 8]. В центральном сегменте острова карта охватывала только его западную часть. В геодезическую основу карты были положены линии повторного высокоточного нивелирования. Для получения абсолютных скоростей вертикальных движений в качестве исходных использовались данные постов наблюдений за уровнем морей. Поправка в мареографические данные за эвстатический подъем уровня Мирового океана не вводилась, что является основным недостатком карты и приводит к некорректным величинам абсолютных (вековых) скоростей и их интерпретации. Этот недочет нельзя отнести к упущению авторов карты: скорость эвстатического подъема уровня Мирового океана ко времени составления карты была предметом обширных дискуссий и оценена с достаточной точностью только к началу XXI в. [9].

Геодинамическая сеть в центре острова, в отличие от севера и юга, на начальном этапе исследований не имела должного сгущения и не позволяла в полной мере оценить горизонтальные и вертикальные смещения отдельных структурных элементов. В 2011 г. поперечный профиль в этой части острова был дополнен новыми промежуточными пунктами наблюдений (рис. 1 б). Данные повторных измерений GNSS-сети в 2023 г. позволили детализировать региональные геодинамические исследования.

Целью настоящей работы является уточнение картины современных горизонтальных деформаций земной поверхности и оценка вековых вертикальных движений неотектонических структур центральной части о. Сахалин на основе межсейсмических скоростей пунктов геодинамической GNSS-сети.

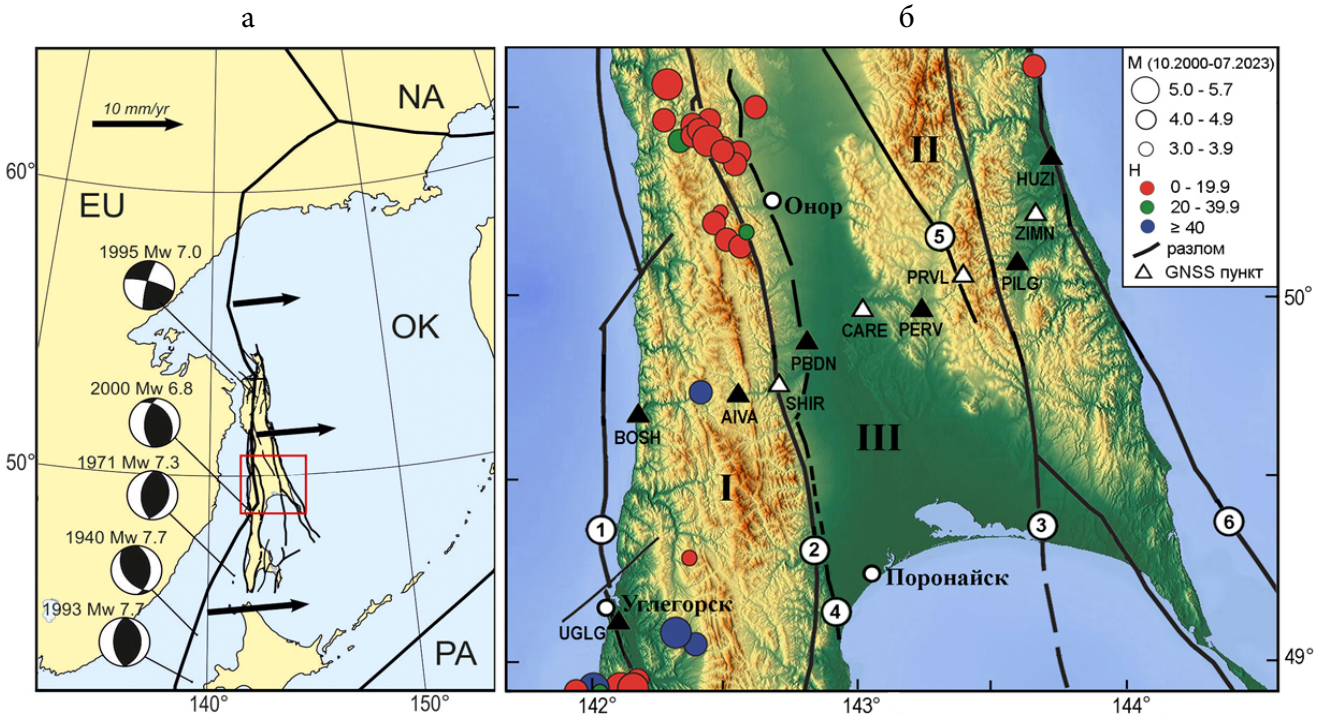

Рис. 1. (а) Границы литосферных плит региона: EU – Евразийская, NA – Североамериканская, PA – Тихоокеанская, OK – Охотская. Стрелками показаны скорости схождения литосферных плит относительно Северной Америки [10]. Механизмы очагов сильнейших землетрясений приведены по данным The United States Geological Survey (https://earthquake.usgs.gov). Прямоугольником выделен район исследований. (б) Схема расположения GNSS-пунктов геодинамической сети центральной части о. Сахалин и эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$ за период октябрь 2000 – июль 2023 гг. Черными треугольниками обозначены пункты, наблюдения на которых начаты в 2000 г., белыми – в 2011 г. I – Западно-Сахалинское поднятие, II – Восточно-Сахалинское поднятие, III – Тымь-Поронайский прогиб. Трансрегиональные литосферные разломы: 1 – Западно-Сахалинский, 2 – Центрально-Сахалинский, 3 – Хоккайдо-Сахалинский; коровые разломы: 4 – Апреловский, 5 – Первомайский, 6 – Пограничный. Разломы показаны по данным [11] с упрощением.

Fig. 1. (a) The boundaries of the lithospheric plates: EU, Eurasian; NA, North American; PA, Pacific; OK, Okhotsk. The arrows show the rates of convergence of the lithospheric plates in relation to North American [10]. The focal mechanisms of the strongest earthquakes are given according to The United States Geological Survey (https://earthquake.usgs.gov). The research area is marked by rectangle. б) The layout scheme of GNSS points of the Central Sakhalin geodynamical network and earthquake epicentres with M ≥ 3.0 for the period from October 2000 to July 2023. Black triangles indicate the points where observations began in 2000; white ones, in 2011. I, West-Sakhalin uplift; II, East-Sakhalin uplift; III, Tym-Poronaysk depression. The trans-regional lithospheric faults: 1, West-Sakhalin; 2, Central- Sakhalin; 3, Hokkaido-Sakhalin; and crustal faults: 4, Aprelovsky; 5, Pervomaisky; 6, Pogranichny. The faults are given according to [11] (simplified).

Характеристика района исследований

В тектоническом отношении о. Сахалин представляет собой кайнозойскую складчато-блоковую систему [12, 13]. Центральный сегмент острова в региональном структурно-неотектоническом плане состоит из двух поднятий: молодого, плиоцен-четвертичного Западно-Сахалинского и более древнего, мел-палеогенового Восточно-Сахалинского, видоизмененно-возрожденного в плиоцен-четвертичное время, – разделенных Тымь-Поронайским прогибом (рис. 1 б). Западно-Сахалинское поднятие представляет собой единое, субмеридионально вытянутое вдоль острова горное сооружение, состоящее из субпараллельно вытянутых хребтов, тогда как Восточно-Сахалинское поднятие состоит из отдельных, резко разобщенных хребтов, образующих сложную горную систему.

Крупнейшие дизъюнктивы центральной части острова многими исследователями отнесены к разломам разного ранга – трансрегиональным литосферным разломам (Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский, Хоккайдо-Сахалинский) и региональным коровым разломам [3, 11, 13–15]. Кинематику Западно-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов большинство исследователей

характеризует как взбросо-надвиговую, с явными признаками правосторонних сдвигов. Представления о направлении смещения в центральном сегменте Хоккайдо-Сахалинского разлома весьма разноречивы.

Сейсмичность района исследований за весь период инструментальных сейсмологических наблюдений характеризуется неоднородным распределением эпицентров землетрясений, гипоцентры которых сосредоточены в основном в земной коре на глубинах до 20 км [5]. Высокой сейсмической активностью выделяется территория Западно-Сахалинского поднятия, тогда как районы Тымь-Поронайского прогиба и большей части Восточно-Сахалинского поднятия практически асейсмичны. Небольшой участок редких и относительно слабых землетрясений $M \leq 4.9$ отмечается только в восточной части Восточно-Сахалинского поднятия на широте ~50.7° N между Хоккайдо-Сахалинским и Пограничным разломами.

Повышенная сейсмичность Западно-Сахалинского поднятия тесно связана с тектонической активностью ограничивающих его трансрегиональных разломов – Западно-Сахалинского и Центрально-Сахалинского. Области сгущения умеренных и сильных землетрясений, приуроченные к зонам этих разломов и их оперений, разделены участками с редкими эпицентрами слабых толчков. В зоне Западно-Сахалинского разлома произошло несколько сильных землетрясений, в том числе Лесогорско-Углегорское 1924 г. Mw = 6.7 и Углегорское 2000 г. Mw = 6.8 [5] (рис. 1 а). Несколько меньшая сейсмичность присуща зоне Центрально-Сахалинского разлома (включая оперяющий его Апреловский разлом). В районе Онорского сегмента этого разлома за инструментальный период сейсмологических наблюдений произошло несколько землетрясений с $M \approx 5.0$. Однако по результатам палеосейсмологических исследований разлом способен генерировать землетрясения с M = 7.0–7.5 [16].

Сильнейшим сейсмическим событием в центральной части о. Сахалин за период GNSS-наблюдений (2000–2023 гг.) явилось Онорское землетрясение 14.08.2016 г. Mw = 5.8, удаленное от поперечного профиля на 65 км [17]. Очаг землетрясения был приурочен к одной из вторичных структур Центрально-Сахалинского взброса-надвига – оперяющему разлому, секущему Западно-Сахалинские горы в направлении побережья (рис. 1 б). Коровых землетрясений с $M \geq 3$ в ближайших окрестностях геодинамической сети не зафиксировано.

Геодинамическая сеть, аппаратура и методы исследований

Геодинамические GNSS-исследования в центральной части Сахалина начаты спустя три месяца после Углегорского землетрясения 4(5).08.2000 г. Mw = 6.8. На начальном этапе сеть состояла из шести пунктов поперечного профиля, пересекающего островную сушу на широте около 50° N (BOSH, AIVA, PBDN, PERV, PILG и HUZI), и опорного пункта UGLG (г. Углегорск), расположенного южнее профиля на западном побережье острова (рис. 1 б). В качестве геодезических центров на пунктах поперечного профиля использованы грунтовые реперы трубчатой конструкции. Пункт UGLG представляет собой металлический пилон, заложенный бурением на глубину ~3 м, с площадкой принудительного центрирования антенны (рис. 2 а). Для долговременной стабильности реперы закладывались ниже глубины наибольшего промерзания грунта в районе исследований, а их якоря и нижняя часть пилона бетонировались.

В 2002 и 2005 гг. были проведены повторные GNSS-измерения геодинамической сети и получены первые сведения о величинах скоростей современных горизонтальных движений земной поверхности [4]. В августе 2009 г. в рамках Целевой комплексной программы научных исследований ДВО РАН «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России» пункт UGLG переведен в непрерывный режим регистрации данных [18] (рис. 2 б). В 2011 г. на профиле были заложены новые промежуточные центры (SHIR, CARE, PRVL и ZIMN), что позволило детализировать региональные гео-

динамические исследования (рис. 1 б). Последнее измерение всей сети проведено в 2023 г.

На поперечном профиле измерения выполнялись двухчастотными приемниками AshTech Z-XII и Trimble NetRS с антеннами типа Choke Ring и Trimble Zephyr Geodetic, при этом на всех пунктах использовались те же антенны, что и в предшествующие эпохи наблюдений (рис. 3). Для минимизации сезонного влияния на точность позиционирования полевые работы проводились в летне-осенний период. Антенны закрепляли на стандартных штативах, их центрирование осуществлялось с помощью оптического центрира Carl Zeiss (Jena) с ценой деления 3′. Высоты антенн измерялись с точностью 0.1 мм и контролировались, как и центрирование, после выполнения наблюдений.

Продолжительность измерительной сессии на каждом пункте поперечного профиля составляла не менее 3 суток. Суточные файлы формировались с 30-секундной дискретностью и маской возвышения спутников от 5°. Обработка данных осуществлялась с использованием специализированного пакета программного обеспечения Bernese 5.2 [19]. Высокая точность результатов измерений достигалась после учета различных поправок в процессе обработки. При этом использовались финальные орбиты спутников, представленные IGS (International GNSS Service), параметры ориентации вращения Земли IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), таблицы зависимостей фазовых центров антенн, параметры Солнца и Луны и другие материалы, рекомендованные Международной GNSS службой. В качестве примера на рис. 4 показаны результаты суточных измерений на пункте AIVA в 2023 г.

а б

Рис. 2. Станция непрерывной регистрации UGLG (г. Углегорск): а – пилон с антенной Trimble Zephyr Geodetic Mod. 2; б – GNSS приемник Trimble NetR5.

Fig. 2. UGLG station of permanent registration (Uglegorsk town): (a) pylon with antenna Trimble Zephyr Geodetic Mod. 2; (b) GNSS receiver Trimble NetR5.

а б

Рис. 3. GNSS наблюдения в 2023 г.: а – на пункте PERV с антенной ChokeRing; б – на пункте ZIMN с антенной Zephyr Geodetic.

Fig. 3. GNSS observations in 2023: (a) at PERV point with ChokeRing antenna; (b) at ZIMN point with Zephyr Geodetic antenna.

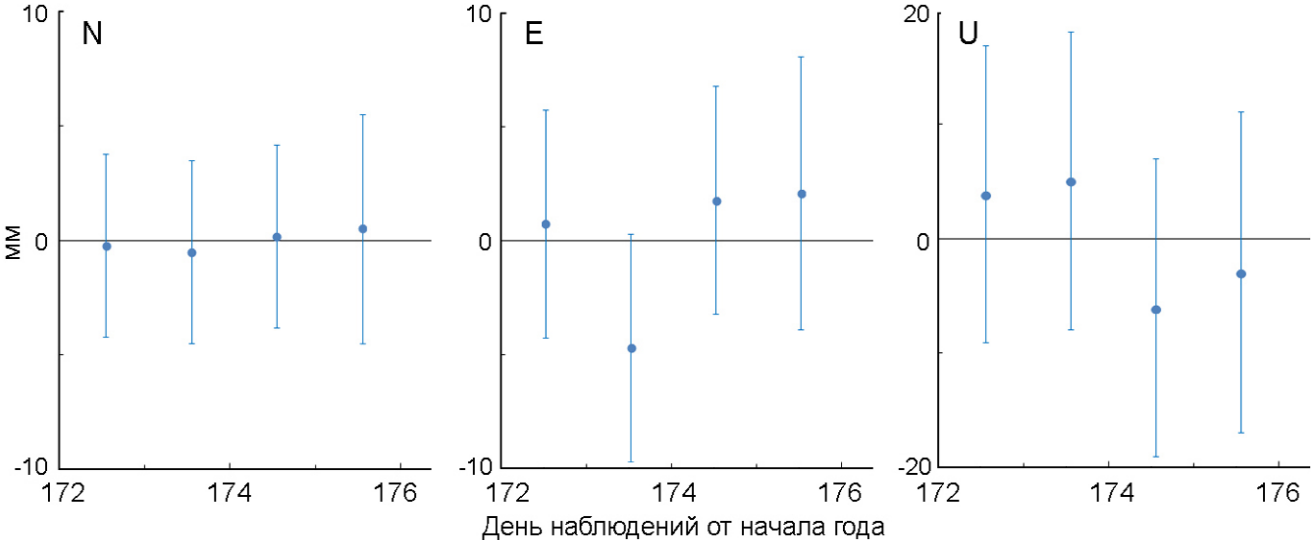

Рис. 4. Графики суточной повторяемости координат пункта AIVA в 2023 г. относительно станции UGLG по компонентам: N – север, E – восток, U – вверх. Априорная оценка точности суточных измерений показана вертикальными линиями вверх–вниз от каждой точки.

Fig. 4. Plots of diurnal coordinate repetition of AIVA point in 2023 relative to UGLG station by components: N, north; E, east; U, up. A priori estimation of diurnal observation accuracy is shown by vertical lines up and down from each point.

Результаты и обсуждение

Скорости современных движений земной поверхности центральной части о. Сахалин определены для 11 пунктов сети, на которых с 2000 по 2023 г. было проведено от 2 до 5 циклов GNSS-измерений. За весь период наблюдений в районе исследований не зарегистрировано крупных сейсмических событий, а трехмесячный интервал времени после сильнейшего Углегорского землетрясения до первой эпохи измерений дает основание полагать, что полученные скорости не подвержены влиянию постсейсмических эффектов, сопровождавших землетрясение. Поэтому скорости смещений пунктов можно уверенно отнести к межсейсмическим скоростям, свободным от влияния сейсмических событий. Для выделения составляющих, обусловленных пограничным деформированием в контексте тектонического строения района исследований, окончательные результаты представлены в виде скоростей смещений пунктов относительно удаленной станции UGLG (г. Углегорск). Временные ряды изменения координат одного из пунктов – пункта AIVA – показаны на рис. 5. Схемы скоростей горизонтальных и вертикальных смещений представлены на рис. 6.

Горизонтальные скорости всех пунктов достоверны, среднеквадратические ошибки определения их компонент не превышают 0.2 мм/год. Ошибки вертикальных скоростей пунктов, наблюдавшихся в 2000–2023 гг., варьируют в пределах 0.2–0.4 мм/год; для большинства пунктов, наблюдавшихся в 2011–2023 гг., не превышают 0.5 мм/год, и только на пункте PRVL ошибка достигает 0.8 мм/год.

Горизонтальные движения

Векторы горизонтальных смещений пунктов поперечного профиля в основном демонстрируют взаимную согласованность. Их скорости достаточно монотонно возрастают с запада на восток, достигая максимальных значений 3.2 мм/год на пунктах ZIMN и HUZI. К востоку от Центрально-Сахалинского разлома скорости меняют свое направление от ЮЮЗ на ЮЗ. Кинематика района в целом свидетельствует о субширотном сжатии островной суши со скоростью ~2 мм/год и правостороннем сдвиге ~2.5 мм/год. Такая картина горизонтальных движений соответствует тектоническому режиму зоны конвергенции Евразийской и Североамериканской (Охотской) литосферных плит и находит отражение в направлениях регионального тензора напряжений сжатия по данным механизмов очагов землетрясений [20].

На основе горизонтальных скоростей смещений пунктов вычислены среднегодовые скорости деформаций земной поверхности. Расчет осуществлялся по методике [21], которая реализует подход модифицированного метода наименьших квадратов [22]. На основе полученных собственных значений

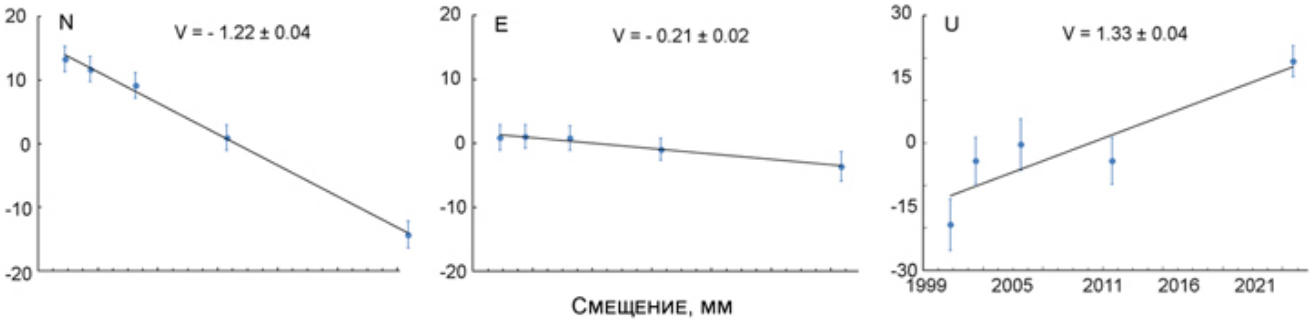

Рис. 5. Временные ряды изменения координаты пункта AIVA за период 2000–2023 гг. относительно станции UGLG по компонентам: N – север, E – восток, U – вверх. Прямой линией показана линейная аппроксимация временного ряда, вертикальными линиями вверх–вниз от каждой точки – априорная оценка точности наблюдений..

Fig. 5. Coordinate time series of AIVA point for the period from 2000 to 2023 relative to UGLG station by components: N, north; E, east; U, up. The straight line shows linear approximation of the time series, a priori estimation of observation accuracy is shown by vertical lines up and down from each point.

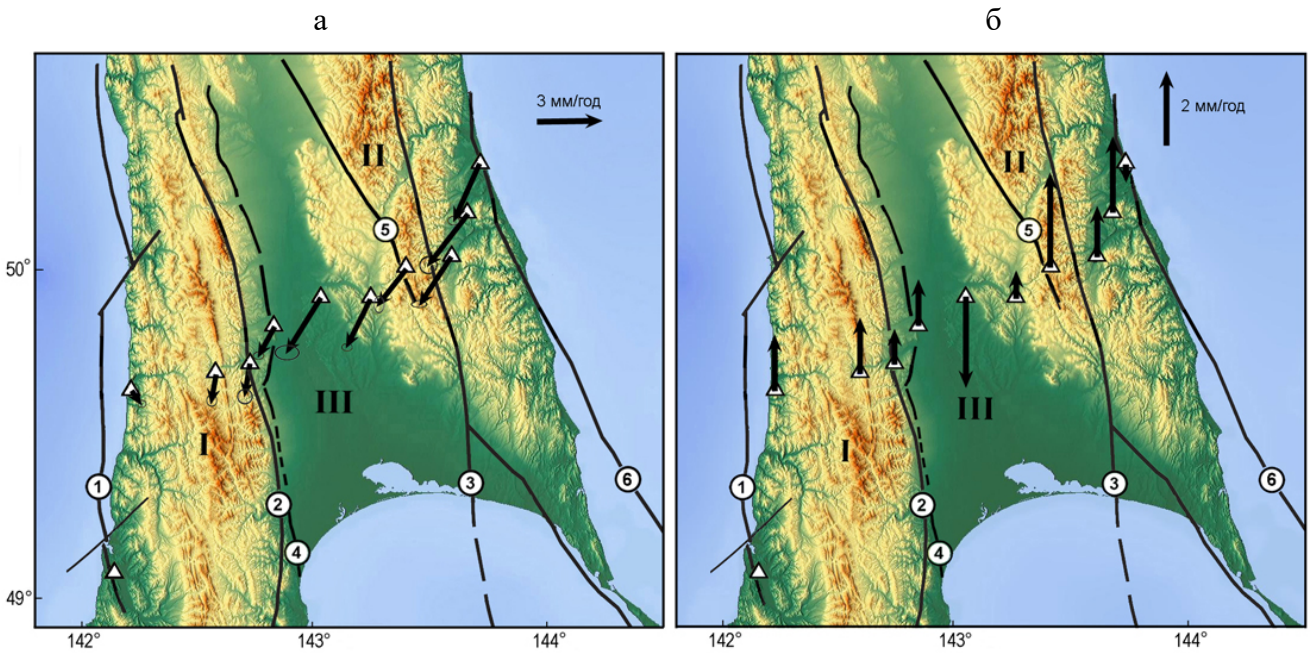

Рис. 6. Схемы скоростей горизонтальных (а) и вертикальных (б) смещений пунктов поперечного профиля за период 2000–2023 гг. относительно станции UGLG (г. Углегорск). Эллипсом показаны 1σ ошибки горизонтальных скоростей. Условные обозначения см. рис. 1.

Fig. 6. Schemes of horizontal (a) and vertical (b) rates of the displacement of transversal profile points for the period from 2000 to 2023 relative to UGLG station (Uglegorsk town). Ellipse indicates 1σ errors of horizontal rates. For symbols, see Fig. 1.

тензора скорости деформаций вычислены скорости плоской деформации (дилатации).

Центральный сегмент острова в целом характеризуется весьма неоднородным характером деформирования земной поверхности с преобладанием условий одноосного сжатия (рис. 7). В распределении деформаций можно выделить несколько областей с различной геодинамической обстановкой.

Район между Западно-Сахалинским и Центрально-Сахалинским разломами испытывает практически одноосное сжатие ЮЗ-СВ направления со скоростью (–20… –30) × 10^{-9} в год.

Максимальные скорости горизонтальных деформаций (до $|45–50| \times 10^{-9}$ в год) приурочены к зоне Центрально-Сахалинского взбросо-надвига и его ближайшим окрестностям. Скорости сжатия и растяжения здесь практически сопоставимы (скорость дилатации не превышает –5 × 10^{-9} в год). Правосторонний сдвиг в зоне разлома (~1 мм/год) подтверждает его кинематику по данным геолого-геоморфологических исследований [14].

Наиболее интенсивное сокращение земной поверхности в направлении СЗ-ЮВ происходит в восточной части района между Пограничным и Хоккайдо-Сахалинским разломами, где скорость дилатации достигает –45 × 10^{-9} в год. К западу от Первомайского раз-

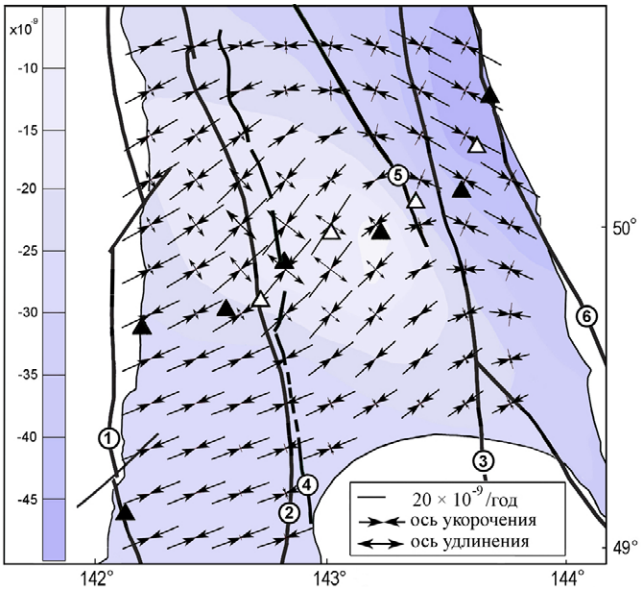

Рис. 7. Скорости дилатации и горизонтальных деформаций земной поверхности центральной части о. Сахалин за 2000–2023 гг. Остальные условные обозначения см. рис. 1.

Fig. 7. The rates of dilation and horizontal deformations of the earth's surface in Central Sakhalin for the period from 2000 to 2023. For symbols, see Fig. 1.

лома СЗ-ЮВ ориентация деформаций сжатия меняет свое направление на ЮЗ-СВ. Непосредственно в зоне Хоккайдо-Сахалинского взбросо-надвига, судя по векторам горизонтальных скоростей пунктов PRVL и PILG, наблюдается небольшое (в пределах ошибок) правостороннее смещение со скоростью ~0.4 мм/год.

По сравнению с предыдущим периодом наблюдений [6] качественных изменений в характере деформирования района исследований не происходит, однако полученные с увеличением количества пунктов наблюдательной сети оценки являются более надежными.

Вертикальные движения

Скорости вертикальных смещений пунктов поперечного профиля на начальном этапе определены относительно опорной станции UGLG, которая расположена в 2.5 км от мареографического (уровнемерного) поста. По результатам исследований Г.Г. Якушко вертикальная скорость ближайших окрестностей островной суши относительно уровня моря (без учета эвстатического подъема уровня Мирового океана) за расчетный период 1964–1986 гг. составляла 0.0 ± 0.5 мм/год [23]. К сожалению, в дальнейшем эти исследования не выполнялись, поэтому абсолютная скорость поднятия опорной станции оценена величиной 2.0 ± 0.6 мм/год путем добавления скорости эвстатического подъема уровня Мирового океана (1.96 ± 0.20 мм/год) на среднюю дату расчетного периода [9].

Приведение вертикальных скоростей пунктов к абсолютным значениям выполнено добавлением абсолютной скорости опорной станции, приняв ее неизменной (рис. 8). Среднеквадратические ошибки абсолютных скоростей за период 2000–2023 гг. не превышают 0.7 мм/год; на пунктах, наблюдавшихся только в 2011 и 2023 гг., достигают 1.0 мм/год. Тем не менее, практически все скорости достоверны, поскольку их величины превышают 3 среднеквадратические ошибки. Исключением является только абсолютная скорость опускания пункта CARE, сопоставимая с ошибкой ее определения.

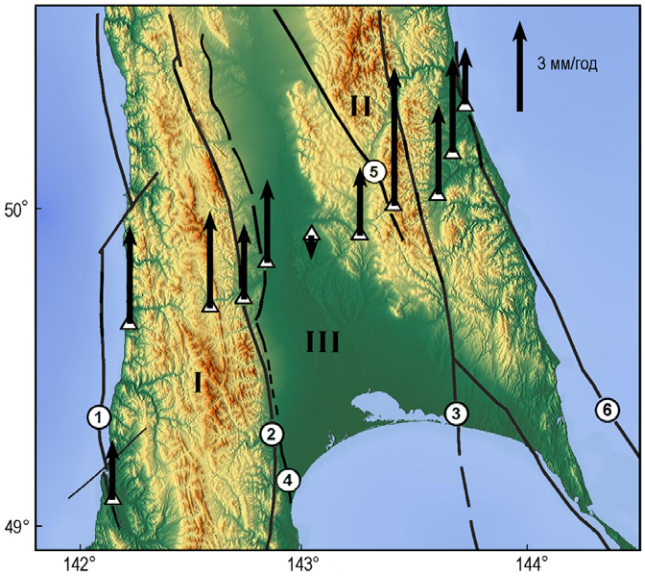

Рис. 8. Схема абсолютных вертикальных скоростей пунктов геодинамической сети центральной части о. Сахалин. Условные обозначения см. рис. 1.

Fig. 8. Scheme of the absolute vertical rates of the points of Central Sakhalin geodynamic network. For symbols, see Fig. 1.

Скорости пунктов поперечного профиля, пересекающего Восточно-Сахалинское поднятие, неоднородны. Центральная его часть (пункты PRVL, PILG и ZIMN) воздымается со средней скоростью 3.9 мм/год. Максимальная скорость поднятия (4.7 мм/год) отмечается на пункте PRVL с самой большой высотной отметкой (792 м) на всем профиле. Пункты HUZI и PERV, расположенные, соответственно, в краевой впадине на востоке поднятия и вблизи западного его борта, поднимаются, соответственно, со скоростью 1.8 и 2.3 мм/год.

В зоне Западно-Сахалинского поднятия пункты BOSH, AIVA, SHIR и PBDN испытывают поднятие со скоростью 2.5–3.3 мм/год. Меньшая скорость опорной станции UGLG (2.0 мм/год), скорее всего, обусловлена ее расположением в западной подзоне относительно опущенных структур этого поднятия.

Для неотектонического этапа развития о. Сахалин на основе геолого-геоморфологических исследований установлено, что главной тенденцией современных движений является направленное воздымание поднятий, на фоне которых лишь некоторые районы

испытывают относительное погружение [24]. Однако количественные оценки этих движений практически отсутствуют. Только для западного побережья острова по результатам нивелировки морских береговых валов и составлению продольных профилей по прибрежным террасам средняя скорость поднятия оценена величиной 2.5–3 мм/год.

Абсолютные вертикальные движения центральной части острова по данным GNSS-наблюдений имеют унаследованный характер по отношению к новейшим структурам и дают количественную оценку их вековых скоростей. Положительные структуры воздымаются со средней скоростью ~3 мм/год, в то время как разделяющий их прогиб с незначительной скоростью опускается. Абсолютные скорости станции UGLG и пункта BOSH (2.0 и 3.3 мм/год соответственно) хорошо согласуются с неотектонической оценкой скорости поднятия западного побережья острова. Локальные неоднородности неотектонических структур Западно-Сахалинского и Восточно-Сахалинского поднятий находят отражение в скоростях их вертикальных движений. Согласуется с геолого-геоморфологическими исследованиями и некоторое нарастание с запада на восток острова амплитуд и градиентов скоростей вертикальных движений.

Карта современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин в районе GNSS-исследований охватывала только территорию Западно-Сахалинского поднятия [7, 8]. В зоне этого поднятия линии повторного нивелирования проходили в окрестностях 5 пунктов геодинамической сети, что позволило сравнить абсолютные вертикальные скорости земной поверхности, полученные двумя различными методами. Расчеты показывают, что карта СВДЗК, после коррекции исходных данных ближайших уровнемерных постов (Углегорска и Поронайска), приведенных в более поздней работе [23], и учета поправки за эвстатический подъем уровня Мирового океана [9], может быть информативной (в пределах ее точности) для оценки вековых вертикальных движений центральной части острова.

Заключение

На основе межсейсмических скоростей пунктов геодинамической GNSS сети за период 2000–2023 гг. детализирована сложная картина современных горизонтальных деформаций земной поверхности и оценены вековые вертикальные движения неотектонических структур центральной части о. Сахалин.

Район исследований характеризуется неоднородным деформированием с преобладанием условий одноосного горизонтального сжатия земной поверхности. Максимальное сокращение земной поверхности происходит между Пограничным и Хоккайдо-Сахалинским разломами, где скорость дилатации достигает -45×10^{-9} в год. Область минимальных скоростей дилатации ($-5\ldots-10) \times 10^{-9}$ в год) и интенсивных деформаций правостороннего сдвига приурочена к зоне Центрально-Сахалинского разлома и его ближайшим окрестностям. Скорости деформаций сжатия и растяжения здесь сопоставимы по величине и достигают максимальных значений (до $|45–50| \times 10^{-9}$ в год).

Кинематика района в целом свидетельствует о сжатии островной суши со скоростью ~2 мм/год и правостороннем сдвиге ~2.5 мм/год, что соответствует современному тектоническому режиму региона. Правосторонний сдвиг в зоне Центрально-Сахалинского взбросо-надвига (~1 мм/год) подтверждает его кинематику по данным геолого-геоморфологических исследований. В зоне Хоккайдо-Сахалинского взбросо-надвига проявляются признаки (в пределах ошибок) правостороннего сдвига со скоростью ~0.4 мм/год.

Абсолютные межсейсмические вертикальные движения земной поверхности центральной части острова подтверждают общую тенденцию неотектонических движений. По отношению к новейшим структурам они имеют унаследованный характер и дают количественную оценку вековых скоростей. Превалирующие воздымания со скоростью ~3 мм/год проявляются в пределах Западно-Сахалинского и Восточно-Сахалинского поднятий. Локальные их неоднородности находят

отражение в скоростях вертикальных движений. Небольшое опускание земной поверхности происходит в Тымь-Поронайском прогибе.

Результаты GNSS-наблюдений, в отличие от карты современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин, позволили получить первую оценку вековых вертикальных движений всех неотектонических структур района исследований. Карта СВДЗК, в центральном сегменте острова ограниченная Западно-Сахалинским поднятием и Тымь-Поронайским прогибом, может быть информативной для оценки вековых движений после коррекции исходных мареографических данных и учета поправки за эвстатический подъем уровня Мирового океана.

Полученные оценки накопления деформаций земной коры имеют принципиальное значение для исследования процессов подготовки землетрясений в центральной части о. Сахалин.

Список литературы

1. Chapman M.E., Solomon S.C. **1976.** North American-Eurasian plate boundary in northeast Asia. *J. of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, 81(5): 921–930. https://doi.org/10.1029/JB081i005p00921
2. Zonenshain L.P., Savostin L.A. **1981.** Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. *Tectonophysics*, 76(1-2): 1–45. https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1
3. Fournier V., Jolivet L., Huchon P., Sergeyev K.F., Oscorbin L.S. **1994.** Neogene strike-slip faulting in Sakhalin and the Japan Sea opening. *J. of Geophysical Research: Solid Earth,* 99(B2): 2701–2725. https://doi.org/10.1029/93JB02026
4. Василенко Н.Ф., Прытков А.С. **2012.** Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений. *Тихоокеанская геология*, 31(1): 42–48.
5. Поплавская Л.Н. (ред.) **2006.** *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.
6. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. **2018.** Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений. *Геодинамика и тектонофизика*, 9(2): 503–514. https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358
7. *Карта современных вертикальных движений земной коры о. Сахалин*: 1:1 250 000. **1980.** Хабаровск: ГУГК.
8. Сергеев К.Ф., Никитенко Ю.П., Шульман В.А., Золотарская С.Б., Захаров В.К., Семакин В.П., Якушко Г.Г. **1981.** Современные вертикальные движения земной коры о. Сахалин. *Доклады АН СССР*, 257(1): 202–204.
9. Church J.A., White N.J. **2006.** A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 33: L01602. https://doi.org/10.1029/2005GL024826
10. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., **2010.** Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181: 1–80. https://doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x
11. Харахинов В.В. **2010.** *Нефтегазовая геология Сахалинского региона*. М.: Научный мир, 276 с.
12. Мельников О.А. **1987.** *Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области*. М.: Наука, 95 с.
13. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. **2007.** *Неотектоника и активные разрывы Сахалина*. М.: Наука, 186 с.
14. Рождественский В.С. **1982.** Роль сдвигов в структуре Сахалина. *Геотектоника*, (4): 99–111.
15. Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. **1984.** Разломы Сахалина. *Тихоокеанская геология*, (2): 77–87.
16. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстрашнов В.М., Стром А.Л., Сузуки Я., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимамото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Я. **2002.** Активные разломы северо-восточного Сахалина. *Геотектоника*, (3): 66–86.
17. Прытков А.С., Сафонов Д.А., Полец А.Ю. **2018.** Модель очага Онорского землетрясения 14 августа 2016 г. Mw=5.8 (о. Сахалин). *Тихоокеанская геология*, 37(5): 112–119. https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-5-112-119
18. Быков В.Г., Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Сорокин А.А., Коновалов А.В., Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Сафонов Д.А., Коломиец А.Г., Серов М.А., Пупатенко В.В., Королев С.П., Михайлов К.В., Жижерин В.С., Рябинкин К.С. **2020.** Единая сеть геодинамических наблюдений ДВО РАН: становление, 10 лет развития, основные достижения. *Вестник ДВО РАН*, 3(211): 5–24. https://doi.org/10.37102/08697698.2020.211.3.001
19. Dach R., Andritsch F., Arnold D., Thaller D. **2015.** *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Astronomical Institute of University of Berne, 852 p.
20. Коновалов А.В., Степнов А.А., Гаврилов А.В., Манайчев К.А., Сычев А.С., Клачков В.А., Сабуров М.С. **2016.** Особенности региональной сейсмичности на севере о. Сахалин в связи с про-

мышленным освоением месторождений нефти и газа на шельфе. *История науки и техники*, 6: 63–71.

21. 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. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.006
22. Shen Z.K., Jackson D.D., Ge B.X. **1996.** Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B12): 27957–27980. https://doi.org/10.1029/96jb02544
23. Никонов А.А. **1995.** Современные вертикальные движения берегов на юге Дальнего Востока. *Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г.: Информационно-аналитический бюллетень ФССН*, спец. выпуск. М., с. 80–94.
24. Верещагин В.Н., Ковтунович Ю.М. (ред.) **1970.** *Геология СССР*. Т. 33. *Остров Сахалин. Геологическое описание*. М.: Недра, 432 с.

References

1. Chapman M.E., Solomon S.C. **1976.** North American-Eurasian plate boundary in northeast Asia. *J. of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, 81(5): 921–930. https://doi.org/10.1029/JB081i005p00921
2. Zonenshain L.P., Savostin L.A. **1981.** Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. *Tectonophysics*, 76(1-2): 1–45. https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1
3. Fournier V., Jolivet L., Huchon P., Sergeyev K.F., Oscorbin L.S. **1994.** Neogene strike-slip faulting in Sakhalin and Japan Sea opening. *J. of Geophysical Research: Solid Earth, American Geophysical Union*, 99(B2): 2701–2725. https://doi.org/10.1029/93JB02026
4. Vasilenko N.F., Prytkov A.S. **2012.** GPS-based modeling of the interaction between the lithospheric plates in Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6(1): 35–41. https://doi.org/10.1134/S1819714012010137
5. Poplavskaya L.N. (ed) **2006.** [*Regional catalogue of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005*]. [Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS], 103 p. (In Russ.).
6. 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
7. [*A map of recent vertical crustal movements of Sakhalin Island*]: 1:1 250 000. **1980.** Khabarovsk: GUGK. (In Russ.).
8. Sergeev K.F., Nikitenko Y.P., Shulman V.A., Zolotarskaya S.B., Zakharov V.K., Semakin V.P., Yakushko G.G. **1981.** [Recent vertical crustal motion of Sakhalin Island]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 257: 202–204. (In Russ.)
9. Church J.A., White N.J. **2006.** A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 33: L01602. https://doi.org/10.1029/2005GL024826
10. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., **2010.** Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181: 1–80. https://doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x
11. Kharakhinov V.V. **2010.** *Oil and gas geology of the Sakhalin region*. Moscow: Scientific World, 276 p. (In Russ.).
12. Melnikov O.A. **1987.** [*Structure and geodynamics of the Hokkaido-Sakhalin folded area*]. Moscow: Nauka, 95 p. (In Russ.).
13. Voeikova O.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I. **2007.** [*Neotectonics and active faults of Sakhalin*]. Moscow: Nauka, 186 p. (In Russ.).
14. Rozhdestvensky V.S. **1982.** [The role of shifts in the formation of the Sakhalin structure]. *Geotectonics*, (4): 99–111. (In Russ.).
15. Kharakhinov V.V., Galtsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A. **1984.** [Faults of Sakhalin Island]. *The Pacific Geology*, (2): 77–87. (In Russ.).
16. Bulgakov R.F., Ivashchenko A.I., Kim Ch.U., Sergeev K.F., Streltsov M.I., Kozhurin A.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Shimamoto T., Okumura K., Goto H., Kariya Y. **2002.** Active faults in northeastern Sakhalin. *Geotectonics*, (3): 66–86. (In Russ.).
17. Prytkov A.S., Safonov D.A., Polets A.Yu. **2018.** Model of the source of the Mw = 5.8 Onor earthquake, August 14, 2016, Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 12: 443–449. https://doi.org/10.1134/s1819714018050093
18. Bykov V.G., Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Sorokin A.A., Konovalov A.V., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Safonov D.A., Kolomiets A.G., Serov M.A., Pupatenko V.V., Korolev S.P., Verkhoturov A.L., Zhizherin V.S., Ryabinkin K.S. **2020.** Unified observation network for geodynamic monitoring in FEB RAS: formation, 10 years of development and major achievements. *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, 3(211): 5–24. (In Russ.). https://doi.org/10.37102/08697698.2020.211.3.001
19. Dach R., Andritsch F., Arnold D., Thaller D. **2015.** *Bernese GNSS Software Version 5.2.* Astronomical Institute of University of Berne, 852 p.
20. Konovalov A.V., Stepnov A.A., Gavrilov A.V., Manaychev K.A., Sychov A.S., Klachkov V.A., Saburov M.S. **2016.** [Regional seismicity behavior in the Northern Sakhalin in connection to offshore oil and gas fields

production]. *History of Science and Engineering*, 6: 63–71 (In Russ.).

21. 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. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.006
22. Shen Z.K., Jackson D.D., Ge B.X. **1996.** Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B12): 27957–27980. https://doi.org/10.1029/96jb02544
23. Nikonov A.A. **1995.** [Modern vertical coastal movements in the south of the Far East]. *Neftegorsk earthquake 27(28).05.1995: Information Analysis Bulletin FSSN*, special issue. Moscow, p. 80–94. (In Russ.).
24. Vereshchagin V.N., Kovtunovich Yu.M. (eds) **1970.** *Geology of the USSR*. Vol. 33. *Sakhalin Island. Geological description*. Moscow: Nedra, 432 p. (In Russ.).

Об авторах

Василенко Николай Федорович (https://orcid.org/0000-0003-1591-9071), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, n.vasilenko@imgg.ru

Прытков Александр Сергеевич (https://orcid.org/0000-0003-4488-1682), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, a.prytkov@imgg.ru

Фролов Дмитрий Игоревич (https://orcid.org/0000-0002-7262-0386), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, dm.frolov@mail.ioffe.ru

Тен Александр Сергеевич (https://orcid.org/0009-0007-2469-3584), научный сотрудник, Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия, alexander.s.ten@yandex.ru

About the Authors

Vasilenko, Nikolay F. (https://orcid.org/0000-0003-1591-9071), Cand. in Engineering, Lead Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, n.vasilenko@imgg.ru

Prytkov, Alexander S. (https://orcid.org/0000-0003-4488-1682), Cand. in Physics and Mathematics, Lead Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, a.prytkov@imgg.ru

Frolov, Dmitry I. (https://orcid.org/0000-0002-7262-0386), Cand. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Ioffe Physical-Technical Institute, RAS, Saint Petersburg, Russia, dm.frolov@mail.ioffe.ru

Ten, Alexander S. (https://orcid.org/0009-0007-2469-3584), Researcher, Computing Center, FEB RAS, Khabarovsk, Russia, alexander.s.ten@yandex.ru

Поступила 03.06.2025
Принята к публикации 29.06.2025

Received 3 June 2025
Accepted 29 June 2025