Оценка влияния землетрясений на смещения поверхности острова Сахалин за 1990–2020 гг. и необходимости его учёта для ГНСС-позиционирования

Н. В. Шестаков^{1,4}, Г. В. Нечаев^{1,4}, А. К. Кишкина^{1,7}, Н. Н. Титков², А. С. Прытков³, А. Ю. Полец³, М. Д. Герасименко⁴, Е. А. Лялюшко¹, А. С. Тен⁵, М. Годзе⁶

1 Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690922, Россия E-mail: shestakov.nv@dvfu.ru ² Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия *E-mail: nik@emsd.ru* ³ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН Южно-Сахалинск, 693022, Россия E-mail: a.prytkov@imgg.ru ⁴ Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия *E-mail: henley grange@mail.ru* ⁵ Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия *E-mail: alexander.s.ten@yandex.ru* ⁶ Институт прогнозирования землетрясений Службы землетрясений Китая Пекин, 100036, Китай *E-mail: mgj@ief.ac.cn* ⁷ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия E-mail: kishkina.ako@dvfu.ru

Исследуется вопрос о влиянии сильных коровых и глубокофокусных землетрясений на смещения земной поверхности о. Сахалин и необходимости его учёта для высокоточного ГНСС-позиционирования. Остров Сахалин считается сейсмоактивным регионом, и в то же время он достаточно удалён от зоны субдукции, к которой, как правило, приурочены сильнейшие сейсмические события. В отсутствие в пределах исследуемого региона плотных сетей непрерывно действующих ГНСС-станций для получения первичных оценок горизонтальных и вертикальных косейсмических смещений острова за период 1990-2020 гг. нами было выполнено численное моделирование полей этих смещений с использованием параметров очага девяти землетрясений с моментными магнитудами 5,8 ≤ Мw ≤ 8,3 и глубинами гипоцентров от ~10 до 600 км, произошедших как в пределах острова, так и на значительном удалении от него (несколько сотен километров). Анализ полученных результатов показал, что не только мелко- и среднефокусные землетрясения, происходящие в пределах острова и его ближайших окрестностях, но и возникающие на значительном удалении в зоне субдукции коровые землетрясения с Mw ≥ 8, а также мощные глубокофокусные сейсмические события могут приводить к значимым (миллиметры – сантиметры) косейсмическим смещениям земной коры о. Сахалин. Такие перемещения, особенно накопленные за продолжительный промежуток времени, значимо влияют на точность определения пространственного положения и скорости пунктов государственной геодезической сети высшего порядка — пунктов ФАГС и ВГС и должны учитываться при высокоточных ГНСС-определениях, а также могут быть использованы для уточнения напряжённо-деформированного состояния геосреды и обеспечения безопасной эксплуатации протяжённых линейных объектов, расположенных в исследуемом регионе.

Ключевые слова: ГНСС-позиционирование, система координат, государственная геодезическая сеть, землетрясение, косейсмические смещения, численное моделирование

Одобрена к печати: 05.12.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-113-130

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) широко используются для исследования разномасштабных геодинамических процессов, зондирования атмосферы Земли, высокоточной фиксации и мониторинга изменений земной поверхности, а также для решения многих других научных и прикладных задач. Для определения пространственного положения точек на поверхности Земли и их изменений с течением времени при помощи ГНСС-методов используются глобальные и национальные геоцентрические системы координат, например ITRF 2014 (англ. International Terrestrial Reference Frame, Международная земная система отсчёта) (Altamimi et al., 2016), ПЗ90.11 (параметры Земли 1990 г.) и ГСК-2011 (геодезическая система координат 2011 г.) (Параметры..., 2014), закрепляемые на земной поверхности при помощи пунктов различных геодезических сетей, например международной ГНСС-сети IGS (англ. International GNSS Service, https://igs.org/network/), государственной геодезической сети Российской Федерации (ГГС) (Основные..., 2004), сетей базовых ГНСС-станций, принадлежащих различным организациям. Любое изменение пространственного положения пунктов геодезических сетей напрямую сказывается на точности реализации системы координат и результатах выполнения различных работ и изысканий, опирающихся на эти данные, и должно соответствующим образом учитываться. В регионах с высокой геодинамической активностью одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на стабильность пунктов геодезических сетей, выступает сейсмическая активность, поскольку сильные землетрясения способны инициировать «мгновенные» горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности (косейсмические смещения). Там, где имеются плотные ГНСС-сети, подобные эффекты изучаются и учитываются на основе непрерывных спутниковых наблюдений (см., например, (Sanchez et al., 2013)). Однако на Дальнем Востоке РФ, и на о. Сахалин в частности, количество непрерывно действующих ГНСС-пунктов крайне мало. Эпизодические кратковременные спутниковые геодезические измерения сравнительно высокой плотности проводятся только на локальных геодинамических полигонах (Басманов, 2016), один из которых располагается на севере о. Сахалин. Тем не менее оценки косейсмических смещений всей поверхности острова за достаточно продолжительный временной интервал, насколько нам известно, отсутствуют. Кроме того, оценки косейсмических смещений, особенно их накопленных за больший или меньший промежуток времени (кумулятивных) величин и пространственного распределения, помимо геодезического применения, имеют большое значение для исследования напряжённо-деформированного состояния литосферы, степени сейсмоопасности и стадии развития сейсмического цикла изучаемого региона.

В то же время гипотеза дрейфа литосферных плит Альфреда Вегенра, теория упругой отдачи Гарри Рейда (Reid, 1911) и физико-математическая модель очага землетрясения Йошимицу Окада (Okada, 1992) вполне удовлетворительно качественно и количественно описывают механизмы возникновения и реализации землетрясений, а также их поверхностные проявления. По современным представлениям, большинство землетрясений возникает вследствие непрерывного движения и вязкоупругого взаимодействия вблизи границ литосферных плит и тектонических блоков (рис. 1, см. с. 115). До реализации сильнейших (моментная магнитуда Mw = 9,1-9,2) мелкофокусных землетрясений 2004 и 2011 гг., произошедших у берегов о. Суматра (Индонезия) (Banerjee et al., 2007) и о. Хонсю (Япония) (Simons et al., 2011), а также мощных глубокофокусных землетрясений (Mw = 8,2-8,3) 2013 и 2018 гг. в Охотском море и у берегов о-вов Фиджи (Чебров и др., 2013; Fan et al., 2019) считалось, что инициируемые землетрясениями и измеряемые геодезическими методами косейсмические смещения практически не затрагивают асейсмических внутренних областей крупных литосферных плит, удалённых на тысячи километров от геодинамически активных зон. Однако изучение методами космической геодезии движений земной коры, инициированных этими катастрофическими событиями, показало, что даже такие регионы подвержены косейсмическим смещениям, величины которых превышают ошибки геодезических измерений (Шестаков и др., 2011, 2014; Tregoning et al., 2013). Остров Сахалин, будучи сейсмически активным регионом и районом, в котором находятся протяжённые линейные объекты (нефте- и газопроводы), в то же время удалён от зоны субдукции, где происходят сильнейшие коровые землетрясения, представляясь, таким образом, интересным объектом для подобных исследований.



Рис. 1. Сейсмичность и тектоническое строение региона исследований. Сплошными линиями даны границы крупнейших литосферных плит: EUR — Евроазиатской; РАС — Тихоокеанской; NAM — Северо-Американской. Зубчатой линией обозначена зона субдукции, стрелкой дано направление движения Тихоокеанской плиты. Пунктирными линиями показаны границы предполагаемых Охотоморской (OKH) и Амурской (AMU) микроплит. Жёлтыми кружками даны эпицентры коровых ($H \le 40$ км) землетрясений с моментной магнитудой Mw $\ge 5,8$. Синими кружками показаны эпицентры глубокофокусных ($H \ge 600$ км) и среднефокусных ($100 \le H \le 300$ км) землетрясений с Мw ≥ 7 . Красными и голубым кружками выделены эпицентры рассматриваемых в данной работе коровых и глубокофокусного сейсмических событий соответственно. Для этих землетрясений приведены дата, магнитуда и стереограмма механизма очага по каталогу CMT (*англ*. Global Centroid-Moment-Tensor, https://www.globalcmt.org/)

Цель настоящей работы — на основе данных о параметрах моделей очага сильных землетрясений, произошедших в период 1990—2020 гг. на о. Сахалин и сопредельных с ним территориях, при помощи методов численного моделирования получить первые оценки накопленных косейсмических смещений острова и оценить необходимость учёта их влияния на получение высокоточных положений точек земной поверхности ГНСС-методами.

Современные горизонтальные движения земной коры острова Сахалин

Остров Сахалин — сейсмически активный регион, поскольку испытывает влияние крупнейших литосферных плит: Евроазиатской, Северо-Американской и Тихоокеанской (см. *рис. 1*). В научном сообществе до сих пор нет единого мнения, к какой из этих плит принадлежит о. Сахалин и где проходят их границы. Более того, уже свыше 40 лет обсуждается вопрос возможной принадлежности острова к Амурской и/или Охотоморской микроплитам, выделяемым отдельными авторами в пределах Евроазиатской и Северо-Американской плит (Габсатаров, 2015; Apel et al., 2006; Ashurkov et al., 2016; Zonenshain, Savostin, 1981). Согласно результатам ГНСС-наблюдений и анализа механизмов очагов землетрясений, остров находится в обстановке субширотного сжатия (Прытков, Василенко, 2018). В очагах коровых землетрясений южной и центральной части Сахалина доминирует взбросовая компонента, на севере острова — правосдвиговая (Коновалов и др., 2014). Максимальная инструментально зарегистрированная магнитуда землетрясения, произошедшего в пределах острова, — Мw = 7,1.



Рис. 2. Современные горизонтальные вековые движения земной коры о. Сахалин в системе координат IGb14 по данным непрерывных ГНСС-наблюдений

Согласно результатам обработки данных непрерывных специализированных ГНСС-измерений, более 10 лет выполняемых нами на пунктах геодинамической сети Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВО РАН) (Быков и др., 2020) и пункте глобальной ГНСС-сети IGS под индексом YSSK (г. Южно-Сахалинск), скорости вековых движений земной коры о. Сахалин в системе координат (СК) IGb14 (одна из реализаций СК ITRF2014) уменьшаются от 21 мм/год (север острова, г. Оха) до 15 мм/год (юг острова, Южно-Сахалинск) и направлены к юго-востоку (*puc. 2, maбл. 1*). Интерполируя значения скоростей ГНСС-пунктов и преобразуя их из топоцентрической пространственной прямоугольной системы координат (V_n , V_e , V_u) в геоцентрическую (V_X , V_Y , V_Z) (Антонович, 2005), можно вычислить значения высокоточных пространственных координат пунктов, расположенных в пределах острова, на любую эпоху (момент времени) с помощью соотношения:

$$\begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{t_0} \\ Y_{t_0} \\ Z_{t_0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix} \Delta t + \begin{pmatrix} \Delta X(\Delta t) \\ \Delta Y(\Delta t) \\ \Delta Z(\Delta t) \end{pmatrix},$$
(1)

где $(X_{t_0}, Y_{t_0}, Z_{t_0})^T$ — вектор геоцентрических координат пункта в некоторую начальную эпоху t_0 ; $(V_X, V_Y, V_Z)^T$ — вектор скоростей изменения координат пункта с течением времени по соответствующим осям системы координат; Δt — промежуток времени между данной t и начальной эпохой t_0 , на которую были получены координаты; $(\Delta X(\Delta t), \Delta Y(\Delta t), \Delta Z(\Delta t))^T$ — накопленные за временной интервал Δt косейсмические смещения. Эти смещения определяются в топоцентрической системе координат $(\Delta N(\Delta t), \Delta E(\Delta t), \Delta U(\Delta t))^T$ по компонентам «север — юг», «восток — запад» и «зенит — надир». Их преобразование в геоцентрическую СК проводится аналогично перевычислению скоростей перемещения. Как правило (см, например, (ГОСТ..., 2017)), для вычислений используются только первые два слагаемых, учитывающие медленные (вековые) изменения координат земной поверхности, обусловленные дрейфом литосферных плит, а косейсмические смещения земной коры полагаются пренебрежимо малыми и не учитываются. Также не принимаются во внимание изменения скоростей движений земной коры вследствие вязкоупругой постсейсмической релаксации литосферы после сильных и сильнейших коровых землетрясений.

Пункт	Скорость, мм/год						
	V _N	V _E	V				
1. Южно-Сахалинск	-10,2	11,4	15,3				
2. Углегорск	-10,7	16,3	19,5				
3. Тымовское	-13,6	15,9	20,9				
4. Oxa	-14,5	15,8	21,4				

Таблица 1. Скорости современных движений земной коры о. Сахалин в системе координат IGb14 по данным непрерывных ГНСС-наблюдений на пунктах геодинамической сети ДВО РАН и IGS

Многолетние непрерывные ГНСС-измерения на о. Сахалин ведутся на очень ограниченном количестве пунктов сети ДВО РАН и двух пунктах фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), расположенных на расстояниях, доходящих до нескольких сотен километров друг от друга (см. *рис. 2*). Только на пункте YSSK эти наблюдения выполняются с 1999 г. На остальных станциях они начались в конце 2008 г. и позднее. Для оценки вклада косейсмических смещений в современные движения земной коры и методы спутникового позиционирования на о. Сахалин ГНСС-данные могут использоваться только в дискретных точках и на ограниченном временном интервале. Поэтому в настоящей работе для расчёта и анализа полей горизонтальных и вертикальных косейсмических смещений исследуемой территории за 1990–2020 гг. нами были использованы численные модели очагов землетрясений различной магнитуды и типа.

Методика вычисления косейсмических смещений

Нами были рассчитаны горизонтальные и вертикальные косейсмические смещения в топоцентрической СК, порождённые девятью сейсмическими событиями с Mw > 6, которые произошли в рассматриваемый временной интервал в пределах исследуемой территории или в соседних с ней регионах и могли оказать заметное влияние на состояние литосферы о. Сахалин. С целью оценки необходимости анализа событий с магнитудами <6 было выполнено численное моделирование косейсмических эффектов Онорского землетрясения 2016 г., Mw = 5,8 (Konovalov et al., 2018). Для повышения точности расчёта косейсмических смещений в исследуемом регионе, там, где это было возможно, при вычислениях использовались детальные мультиплоскостные модели смещений в очаге (англ. finite fault models), pacсчитываемые по телесейсмическим данным и оперативно публикуемые для сильных землетрясений Американской геофизической службой USGS (англ. United States Geological Survey) в каталоге NEIC (англ. National Earthquake Information Center) (https://earthquake.usgs.gov/ earthquakes/search/) или построенные авторами по аналогичным данным (Prytkov et al., 2018). Значения параметров очага для остальных сейсмических событий были взяты из отечественных и зарубежных научных публикаций, указанных в табл. 2 и приведённых в списке литературы. Для независимой оценки точности получения смещений в случаях, когда косейсмические смещения после землетрясения регистрировались на пунктах непрерывно или периодически наблюдаемых отечественных и/или зарубежных геодезических сетей, вычислялись разности (невязки) между наблюдаемыми и модельными подвижками. Величина смещения в очаге Шикотанского землетрясения и большинство параметров Нефтегорского землетрясения (за исключением глубины залегания верхнего края и угла падения плоскости сейсморазрыва, а также направления смещения вдоль неё) были модифицированы под условием минимума невязок смещений, полученных на геодезических пунктах, методом М. Мацууры и Й. Хасегавы (Matsu'ura, Hasegawa, 1987). В *табл. 2* приведены основные параметры очагов анализируемых сейсмических событий, использованные нами для численного моделирования полей косейсмических смещений земной поверхности.

Таблица 2. Основные параметры анализируемых сейсмических событий. Даны координаты верхнего
края очаговой плоскости (поля плоскостей), противоположного её простиранию (Strike). Для муль-
типлоскостных моделей 4-6 и 9 приведён диапазон изменения направления смещения по разлому
(Rake), определяемого отдельно для каждой субплоскости

Землетрясение	Дата	Mw	Координаты, град		<i>L</i> ,	W,	H, км	Strike,	Dip,	Rake,	Slip,
			°с.ш.	° в.д.	KM	KM		град	град	град	М
 Шикотанское (Hiromichi et al., 1995) 	04.10.1994	8,3	43,200	146,300	100	60	15,2	55	51	141	6,0
2. Нефтегорское (Arefiev et al., 2000)	27.05.1995	7,1	53,010	143,990	40	27	0,0	200	80	172	4,3
 Углегорское (Прытков, Василенко, 2006) 	04.08.2000	6,8	48,668	142,183	18	17	3,0	357	54	90	3,0
4. Токачи-Оки*	25.09.2003	8,2	41,776	145,721	272	228	1,7	240	17	80-170	7,80
5. Симуширское-1**	15.11.2006	8,3	47,892	155,879	360	147	0,4	220	16	50-123	8,60
6. Симуширское-2***	13.01.2007	8,2	47,343	155,858	320	93	3,8	220	39	220-290	12,50
7. Невельское (Vasilenko, 2009)	02.08.2007	6,2	46,838	141,923	12	10	4,7	200	38	125	1,30
 8. Охотоморское (Шестаков и др., 2014) 	24.05.2013	8,3	55,480	153,768	181	65	599,0	184	10	266	3,30
9. Онорское (Prytkov et al., 2018)	14.08.2016	5,8	50,489	142,332	30	20	0,0	144	57	37-127	0,04

Примечание: *L* — длина, *W* — ширина, *H* — глубина верхнего края плоскости (поля плоскостей), Dip — угол падения, Slip — смещение в очаге.

* (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20030925195006360_27/finite-fault).

** (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000exfn/finite-fault).

*** (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000f2ab/finite-fault).

Для вычисления полей косейсмических смещений применялся программный пакет STATIC 1D (Pollitz, 1996), позволяющий учесть кривизну и слоистое строение Земли (используемая модель — PREM (*анел.* Preliminary Reference Earth Model, http://ds.iris.edu/spud/ earthmodel/9991844)). Горизонтальные и вертикальные смещения рассчитывались в узлах регулярной сетки, построенной с шагом 0,2° и ограничивающей район между 44—56-й параллелями и 138—148-м меридианами. Полученные поля смещений, инициированных отдельными сейсмическими событиями, суммировались по каждой компоненте с целью расчёта кумулятивных смещений исследуемого региона. Аналогичная операция производилась над модулями плановых и высотных перемещений для оценки абсолютных значений суммарного сейсмического воздействия на земную поверхность о. Сахалин и выявления областей, наиболее подверженных такому воздействию.

Полученные результаты и их анализ

Нами не анализировались косейсмические смещения, инициированные мегаземлетрясением Тохоку 2011 г. (Mw = 9,1), хотя оно и произошло в относительной близости от исследуемого региона и смещения до 4–5 см регистрировались на расстояниях порядка 900–1000 км к западу от эпицентра (Шестаков и др., 2011; Shestakov et al., 2012). В силу субмеридионального простирания очаговой зоны землетрясения о. Сахалин практически не испытал косейсмических перемещений.

Анализ смещений, порождённых Онорским землетрясением 2016 г., Mw = 5,8 (см. *рис. 1*), показал, что максимальные косейсмические движения земной поверхности, которые производят сейсмические события с 5 < Mw < 6, превышают 1 см в очень ограниченной области, находящейся вблизи очаговой зоны. Поэтому вклад таких землетрясений в косейсмические смещения региона в дальнейшем не рассматривался.

Напротив, землетрясения с Mw > 8, происходящие в зоне субдукции, очаги которых удалены от о. Сахалин на сотни километров, могут вызвать значимые (от нескольких миллиметров до первых сантиметров) перемещения земной коры острова в зависимости от механизма очага, глубины и ориентации плоскости сейсмодислокаций и распределения смещений в ней. Например, согласно нашим численным оценкам, землетрясение Токачи-Оки 2003 г. (Mw = 8,2) и Симуширское землетрясение 2006 г. (Mw = 8,3) инициировали плановые косейсмические смещения в южной и юго-восточной части острова порядка 1 см каждое, а горизонтальные перемещения земной коры в южной оконечности острова, вызванные Шикотанским землетрясением 1994 г. (Мw = 8,3), превысили 2 см (см. *табл. 2*, рис. 3 (см. с. 120)). В то же время второе мощное Симуширское землетрясение 2007 г. (Mw = 8,2), произошедшее спустя два месяца после события 16.11.2006 в том же районе, не вызвало сколько-нибудь значимых движений земной поверхности о. Сахалин в силу разницы в механизмах очага: механизм первого события — характерный для Тихоокеанской зоны субдукции пологий взброс, второго — крутой сброс с небольшой сдвиговой компонентой (см. *рис. 1*). Однако произошедшее в 2013 г. в северной части Охотского моря, к западу от п-ова Камчатка, мощное глубокофокусное Охотоморское землетрясение (Mw = 8,3, $H \approx 600$ км), также имевшее сбросовый механизм, породило обширные планово-высотные косейсмические смещения, превысившие 1 см в плане и 0,5 см по высоте в северной части о. Сахалин (*рис.* 4, см. с. 121).

Наибольшие по абсолютной величине значения горизонтальных сдвигов земной коры на о. Сахалин были получены для разрушительного мелкофокусного Нефтегорского землетрясения 1995 г., Mw = 7,1 (*puc. 5*, см. с. 121). Вблизи очаговой зоны оценки смещений земной поверхности превышают несколько метров, исчисляясь сантиметрами на удалении свыше 100 км от эпицентра и охватив даже ближайшую к острову часть континента.

Значительные вертикальные смещения, превышающие 1 м вблизи очаговой зоны и достигающие нескольких дециметров на расстоянии в несколько десятков километров от неё, породило Углегорское землетрясение 2000 г. (Mw = 6.8). Значительно меньшие (порядка нескольких дециметров) и охватывающие локальную область вертикальные подвижки инициировало Невельское землетрясение 2007 г. (Mw = 6,2), произошедшее в Японском море и вызвавшее небольшое цунами и осушение части морского дна (Левин и др., 2009) (*рис. 66* и *76*, см. с. 122).



Рис. 3. Вычисленные абсолютные величины (модули) горизонтальных косейсмических смещений, инициированных землетрясениями: *a* — Токачи-Оки, 25.09.2003, Mw = 8,2; *б* — Смуширское-1, 15.11.2006, Mw = 8,3; *в* — Шикотанское, 04.10.1994, Mw = 8,3; синими стрелками даны вычисленные векторы смещений на пунктах ГНСС-сетей; *г* — результаты сравнения вычисленных и наблюдённых на пунктах японской ГНСС-сети GEONET косейсмических смещений Шикотанского землетрясения, проекция модели очаговой плоскости которого показана серым прямоугольником; верхняя грань плоскости — северо-западная



Рис. 4. Вычисленные (*a*) и наблюдённые (*б*) косейсмические смещения, инициированные Охотоморским глубокофокусным землетрясением 24.05.2013, Мw = 8,3. Рисунок заимствован из работы (Шестаков и др., 2014)



Рис. 5. Вычисленные абсолютные величины (модули) горизонтальных косейсмических смещений, инициированных Нефтегорским коровым землетрясением 27.05.1995, Mw = 7,1 (*a*); стрелками даны вычисленные векторы смещений на пунктах ГНСС-сетей. Результаты сравнения косейсмических смещений, вычисленных и наблюдённых на пунктах государственной геодезической сети по результатам периодических ГНСС-измерений (*б*); жирной сплошной линией обозначена верхняя грань модельной плоскости очага землетрясения (прямоугольник)



Рис. 6. Вычисленные абсолютные величины накопленных за период 1990–2020 гг. косейсмических смещений о. Сахалин и соседних регионов, инициированных девятью рассматриваемыми в работе сейсмическими событиями: *а* — распределение горизонтальных смещений; *б* — распределение вертикальных смещений



Рис. 7. Вычисленные величины накопленных за период 1990–2020 гг. косейсмических смещений (с учётом их знаков) о. Сахалин и соседних регионов, инициированных девятью рассматриваемыми в работе сейсмическими событиями: *а* — распределение горизонтальных смещений; *б* — распределение вертикальных смещений. Векторами и гистограммами даны плановые и вертикальные перемещения пунктов ГНСС-сетей

Оценки накопленных за 30 лет абсолютных значений (модулей) плановых косейсмических движений земной коры приведены на *рис. ба.* Из рисунка видно, что помимо ожидаемых значительных (дециметры и первые метры в зависимости от магнитуды и механизма очага) косейсмических смещений вблизи очаговой зоны коровых землетрясений с Mw > 6,2, произошедших непосредственно в пределах острова, вся его территория испытала многократные косейсмические перемещения (суммарно составляющие величины как минимум 2–5 см), которые инициированы удалёнными сейсмическими событиями с Mw > 8.

Накопленные абсолютные вертикальные смещения (см. *рис. 66*) сопоставимы с горизонтальными по максимальной величине за счёт сильных коровых землетрясений, происходящих на территории острова, однако носят локальный характер и достигают значительных величин (сантиметры – дециметры – метры) только вблизи очаговой зоны землетрясений, имеющих, как правило, выраженную взбросовую компоненту. Вертикальные перемещения значительных участков земной поверхности исследуемого региона величиной от нескольких миллиметров до 1 см могут генерировать удалённые глубокофокусные сейсмические события с Mw > 8 и H > 500 км, что хорошо прослеживается на севере о. Сахалин (см. *рис 6б* и 76).

Последние данные о косейсмических движениях земной коры, производимых землетрясениями с глубиной гипоцентра 100 < H < 200 км и магнитудами 7 < Mw < 8 (Чебров и др., 2016), указывают на то, что и такие сейсмические события могут вносить заметный вклад (миллиметры – 1 см) в планово-высотные перемещения земной коры острова. Однако в рассматриваемый в данной работе период такие события вблизи о. Сахалин зарегистрированы не были.

Распределение кумулятивных косейсмических смещений при учёте их знаков даёт существенно иное распределение подвижек (см. *рис.* 7), что становится следствием различий в механизмах и пространственном расположении очагов как мощных удалённых землетрясений, так и местных сейсмических событий. В одних районах сонаправленные смещения последовательно накапливаются, в других частично компенсируют друг друга.

Особый интерес и практическое значение представляют суммарные смещения на пунктах государственных геодезических сетей РФ высшего ранга — ФАГС (фундаментальная астрономо-геодезическая сеть) и ВГС (высокоточная геодезическая сеть), поскольку именно они стали носителями прецизионных международных гео- и квазигеоцентрических систем координат ITRF, WGS-84 (англ. World Geodetic System, всемирная система геодезических параметров Земли), государственных ПЗ90.11 и ГСК-2011, а также других используемых в РФ систем координат. Согласно нормативной документации (Основные..., 2004), взаимное пространственное положение пунктов ФАГС, размещённых на расстояниях 650-1000 км друг от друга, должно определяться со средней квадратической ошибкой (CKO) $m \le 20$ мм в плане и $m \leq 30$ мм по высоте с учётом скоростей их изменения во времени. Для пунктов ВГС, расстояния между которыми должны находиться в пределах 150-300 км, СКО определяются выражениями вида: $m \leq (3 + 0.05D)$ мм в плане и $m \leq (5 + 0.07D)$ мм по высоте, где D — расстояние между пунктами в километрах, или $m \le 10,5-21,0$ мм в плане и $m \le 21-31$ мм по высоте для допустимого диапазона расстояний (Чебров и др., 2016). На рис. 7а показаны векторы суммарных плановых смещений пунктов ФАГС и ВГС, расположенных на о. Сахалин, с учётом знаков их компонент. Из рисунка следует, что практически на всех пунктах эти смещения превышают несколько сантиметров и существенно различаются в разных частях острова. Очевидно, что получаемое распределение косейсмических движений может существенно изменяться при воздействии очередного сейсмического события или событий, подобных рассмотренным выше. В производственно-изыскательской деятельности на территории РФ с использованием систем ГНСС-позиционирования могут применяться только официально публикуемые в специальных каталогах координаты пунктов ГГС, приведённые к референцной эпохе (см., например, каталоги на сайтах Росреестра (https://cgkipd.ru/opendata/fags/list.php?clear cache=Y) и Центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных (https://rgs-centre.ru/fags-coords)). Поскольку обновление каталогов происходит редко и нерегулярно, отсутствие учёта накопившихся с момента определения и публикации пространственного положения геодезического пункта косеймических смещений при

расчёте координат пунктов по формуле (1) вполне может привести к недопустимым ошибкам их определения. В особенности это касается пунктов ФАГС, к точности получения взаимного положения которых предъявляются повышенные требования, а в силу большой удалённости таких пунктов характер и величина накопленных косейсмических смещений на них могут существенно различаться. Для пунктов ВГС учёт кумулятивных смещений также важен в силу разреженности сети ВГС и необходимости совместного использования нескольких таких пунктов при выполнении геодезических работ и изысканий, а их косейсмические подвижки могут существенно различаться по величине и направлению. По этой же причине учёт кумулятивных косейсмических смещений может оказаться важным при проектировании и эксплуатации протяжённых линейных объектов, например нефте- и газопроводов, расположенных на территории о. Сахалин и прилегающем к нему шельфе. Для геодезических сетей низшего ранга учёт косейсмики необходим только при их нахождении вблизи очаговой зоны землетрясения с Mw > 6.

Заключение

В данной работе методами численного моделирования, использующимися в сейсмологии, впервые получены поля кумулятивных косейсмических смещений, порождённые восемью коровыми и одним глубокофокусным землетрясениями с $5,8 \le Mw \le 8,3$, которые произошли в период 1990—2020 гг. в пределах о. Сахалин и на удалении до нескольких сотен километров от него.

Результаты моделирования показали следующее:

- Землетрясения с Mw < 6 вызывают косейсмические смещения, превышающие 1 см, только вблизи очаговой зоны и учёт их для ГНСС-позиционирования нецелесообразен.
- Сильные коровые землетрясения с Mw > 8, происходящие в зоне субдукции вдоль Курильской дуги, особенно в южной её части, способны генерировать плановые косейсмические перемещения поверхности о. Сахалин до нескольких сантиметров, особенно в южной и восточной его части.
- Сильные глубокофокусные землетрясения с Мw > 8 и H > 500 км, эпицентр которых удалён на сотни километров от о. Сахалин, а также среднефокусные сейсмические события с Мw > 7 и 100 ≤ H ≤ 200 км, происходящие вблизи острова, также способны инициировать значимые (миллиметры – первые сантиметры) косейсмические смещения в плане и по высоте.
- Сумма абсолютных значений плановых косейсмических перемещений за весь рассматриваемый период на всей территории о. Сахалин превышает 2 см, а вблизи эпицентральных районов сильных коровых землетрясений может достигать нескольких метров.
- Кумулятивные смещения территории острова, рассчитанные с учётом знаков их компонент, имеют более сложное распределение, так как в одних районах они происходят сонаправленно, а в других в большей или меньшей степени компенсируют друг друга.
- Косейсмические движения земной поверхности в вертикальной плоскости по абсолютной величине сопоставимы с плановыми движениями, но охватывают локальные области вблизи очага коровых землетрясений. Исключением стало косейсмическое поднятие, инициированное Охотоморским землетрясением 2013 г. (Мw = 8,3) и охватившее всю северную часть острова.
- Учёт косейсмических смещений на пунктах ФАГС и ВГС, как правило, необходим при возникновении корового землетрясения с Мw > 6–7 в пределах нескольких десятков километров от пункта, а при Mw > 8 — на удалении до нескольких сотен километров от него. Сильное глубокофокусное землетрясение также может вызвать необходимость корректировки пространственного положения пункта. С учётом всего вышесказанного обновление координат станций ФАГС и пунктов ВГС, расположенных на территории острова, должно производиться не реже одного раза в пять лет. Для пунктов геодезиче-

ских сетей низшего ранга учёт косейсмики требуется только при их нахождении вблизи очаговой зоны землетрясения с Mw > 6.

Необходимо отметить, что из-за отсутствия достаточного количества сейсмологических и геодезических измерений в исследуемом регионе, несовершенства численных моделей очага и стратиграфии Земли полученные нами численные оценки в ряде случаев дают несколько заниженные значения косейсмических смещений. В настоящей работе также не рассматривались постсейсмические смещения, как правило сопровождающие землетрясения с Mw > 6 и ещё больше увеличивающие изменения координат пунктов изучаемого региона. Всё это дополнительно подчёркивает необходимость дальнейшего изучения, мониторинга, прогнозирования и учёта косейсмических эффектов, порождаемых удалёнными сейсмическими событиями, при практическом применении ГНСС-технологий. Как показано в настоящей работе, использование именно сейсмологических методов позволяет оперативно получать первые оценки распределения косейсмических смещений региона, выявлять районы, наиболее часто подверженные таким движениям, и оптимально организовывать геодезические наблюдения в них.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-27-00599 (https://rscf.ru/project/22-27-00599/).

Литература

- 1. *Антонович К. М.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: моногр. В 2 т. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. Т. 1. 334 с.
- Басманов А. В. Результаты геодезического мониторинга геодинамических полигонов Росреестра на основе измерений 2015 года // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. 12-й Международ. науч. конгресс и выставка. 18–22 апр. 2016, Новосибирск. Пленарное заседание: сб. материалов. Новосибирск: СГУГиТ. 2016. С. 9–15.
- 3. 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., Верхотуров А. Л., Жижерин В. С., Рябинкин К. С. Единая сеть геодинамических наблюдений ДВО РАН: становление, десять лет развития, основные достижения // Вестн. Дальневосточного отд-ния Российской акад. наук. 2020. № 3. С. 5–24. DOI: 10.37102/08697698.2020.211.3.001.
- 4. *Габсатаров Ю. В.* Кинематика микроплит в северо-восточной Азии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2015. 193 с.
- 5. ГОСТ 32453-2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. Стандартинформ, 2017. 23 с.
- 6. *Коновалов А. В., Нагорных Т. В., Сафонов Д. А.* Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Наука, 2014. 252 с. https://doi.org/10.30730/ gtrz.2020.4.4.474-485.
- Левин Б. В., Тихонов И. Н., Кайстреченко В. М., Ким Ч. У., Урбан Н.А., Андреева М. Ю., Борисов С.А., Василенко Н.Ф., Жердева О.А., Злобин Т.К., Золотухин Д.Е., Ивашова Е.П., Ивельская Т.Н., Карташова О.Л., Ковалев П.Д., Ковалев Д.П., Коваленко Н.С., Кожурин А.И., Королев Ю.П., Королев П.Ю., Кофф Г.Л., Левин Ю.Н., Ломтев В.Л., Мельников О.А., Михайлов В.И., Нагорных Т.В., Никифоров С.П., Поплавская Л.Н., Прытков А.С., Рудик М.И., Сасорова Е.В., Сфонов Д.А., Семенов Е.П., Сен Р.С., Соловьев В.Н., Спирин А.И., Стром А.Л., Троицкая Ю.И., Фокина Т.А., Храмушин В.Н., Чернов А.Г., Шевченко Г.В., Шестакова О.М. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин. М.: Янус-К, 2009. 204 с.
- Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации / ГКИНП (ГНТА)-01-006-03. М.: Роскартография, 2004. 29 с.
- 9. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11): Справочный документ / Военно-топографическое управление генерального штаба вооруженных сил Российской Федерации. М., 2014. 52 с.
- 10. Прытков А. С., Василенко Н. Ф. Дислокационная модель очага Углегорского землетрясения 2000 г. (о. Сахалин) // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25. № 6. С. 115–122.
- 11. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 2. С. 503–514. https://doi. org/10.5800/GT-2018-9-2-0358.

- Чебров В. Н., Кугаенко Ю. А., Викулина С. А., Кравченко Н. М., Матвеенко Е. А., Митюшкина С. В., Раевская А. А., Салтыков В. А., Чебров Д. В., Ландер А. В. Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой М_W = 8.3 — сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсомлогических наблюдений // Вестн. Камчатской регион. ассоциации «Учебно-науч. центр». Сер.: Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 17–24.
- Чебров В. Н., Кугаенко Ю. А., Абубакиров И. Р., Дрознина С. Я., Иванова Е. И., Матвеенко Е. А., Митюшкина С. В., Ототюк Д. А., Павлов В. М., Раевская А. А., Салтыков В. А., Сенюков С. Л., Серафимова Ю. К., Скоркина А. А., Титков Н. Н., Чебров Д. В. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с K_S = 15.7, M_W = 7.2, I = 6 (Камчатка) // Вестн. Камчатской регион. ассоциации «Учебно-науч. центр». Сер.: Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 5–16.
- 14. Шестаков Н. В., Герасименко М. Д., Охзоно М. Движения и деформации земной коры Дальнего Востока Российской Федерации, вызванные землетрясением Тохоку 11.03.2011 г., и их влияние на результаты GNSS-наблюдений // Геодезия и картография. 2011. № 8. С. 35–43.
- 15. Шестаков Н. В., Оһгопо М., Такаһаshi Н., Герасименко М.Д., Быков В. Г., Гордеев Е. И., Чебров В. Н., Титков Н. Н., Сероветников С. С., Василенко Н. Ф., Прытков А. С., Сорокин А.А., Серов М.А., Кондратьев М. Н., Пупатенко В. В. Моделирование косейсмических движений земной коры, инициированных глубокофокусным Охотоморским землетрясением 24.05.2013 г., Мw = 8.3 // Докл. Акад. наук. 2014. Т. 457. № 4. С. 1–6.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // J. Geophysical Research. 2016. V. 121. P. 6109–6131. http://dx.doi.org/10.1002/2016JB013098.
- Apel E. V., Burgmann R., Steblov G., Vasilenko N., King R., Prytkov A. Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. Iss. 11. Art. No. L11303. 5 p. https://doi.org/10.1029/2006GL026077.
- Arefiev S., Rogozhin E., Tatevossian R., Rivera L., Cisternas A. The Neftegorsk (Sakhalin Island) 1995 earthquake: a rare interplate event // Geophysical J. Intern. 2000. V. 143. P. 595–607. https://doi. org/10.1046/j.1365-246X.2000.00234.x.
- 19. Ashurkov S. V., Sankov V.A., Serov M.A., Lukyanov P. Yu., Grib N. N., Bordonskii G. S., Dembelov M. G. Evaluation of present-day deformations in the Amurian Plate and its surroundings, based on GPS data // Russian Geology and Geophysics. 2016. V. 57. P. 1626–1634. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.008.
- Banerjee P., Pollitz F. F., Bürgmann R. Coseismic slip distributions of the 26 December 2004 Sumatra – Andaman and 28 March 2005 Nias earthquakes from GPS static offsets // Bull. Seismological Society of America. 2007. V. 97. No. 1A Suppl. P. S86–S102. https://doi.org/10.1785/0120050609.
- Fan W., Wei S. S., Tian D., McGuire J. J., Wiens D. A. Complex and diverse rupture processes of the 2018 Mw 8.2 and Mw 7.9 Tonga-Fiji deep earthquakes // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. Iss. 5. P. 2434–2448. https://doi.org/10.1029/2018GL080997.
- 22. *Hiromichi T., Yuki H., Takeshi S., Manabu H.* Coseismic crustal deformation from the 1994 Hokkaido-Toho-Oki earthquake monitored by a nationwide continuous GPS array in Japan // Geophysical Research Letters. 1995. V. 22. Iss. 13. P. 1669–1672. https://doi.org/10.1029/95GL01659.
- Konovalov A. V., Stepnov A. A., Safonov D. A., Kozhurin A. I., Pavlov A. S., Gavrilov A. V., Manaychev K. A., Tomilev D. Ye., Takahashi H., Ichiyanagi M. The Mw = 5.8 14 August 2016 middle Sakhalin earthquake on a boundary between Okhotsk and Eurasian (Amurian) plates // J. Seismology. 2018. V. 22. Iss. 4. P. 943– 955. https://doi.org/10.1007/s10950-018-9744-y.
- 24. *Matsu'ura M.*, *Hasegawa Y.* A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1987. V. 47. P. 179–187. https://doi. org/10.1016/0031-9201(87)90076-8.
- 25. *Okada Y.* Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seismological Society of America. 1992. V. 82. No. 2. P. 1018–1040. https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018.
- 26. *Pollitz F.* Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // Geophysical J. Intern. 1996. V. 125. Iss. 1. 14 p. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x.
- Prytkov A. S., Safonov D. A., Polets A. Y. Model of the Source of the Mw = 5.8 Onor Earthquake, August 14, 2016, Sakhalin // Russian J. Pacific Geology. 2018. V. 12. Iss. 5. P. 443–449. https://doi.org/10.1134/S1819714018050093.
- 28. *Reid H. F.* The Elastic-Rebound Theory of Earthquakes // Bull. Department of Geology. 1911. V. 2. No. 1. P. 413–444.
- Sanchez L., Seemuller W., Drewes H., Mateo L., Gonzalez G., da Silva A., Pampillon J., Martunez W., Cioce V., Cisneros D., Cimbar S. Long-Term Stability of the SIRGAS Reference Frame and Episodic Station Movements Caused by the Seismic Activity in the SIRGAS Region // Reference Frames for Applications in Geosciences. 2013. P. 153–161. DOI: 10.1007/978-3-642-32998-2_24.
- 30. Shestakov N. V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A. S., Bykov V. G., Gerasimenko M. D., Luneva M. N., Gerasimov G. N., Kolomiets A. G., Bormotov V.A., Vasilenko N. F., Baek J., Park P., Serov M.A. Analysis

of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations // Tectonophysics. 2012. V. 524–525. P. 76–86. https://doi.org/10.1016/j. tecto.2011.12.019.

- Simons M., Minson S. E., Sladen A., Ortega F., Jiang J., Owen S. E., Meng L., Ampuero J.-P., Wei S., Chu R., Helmberger D. V., Kanamori H., Hetland E., Moore A. W., Webb F. H. The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries // Science. 2011. V. 332. Iss. 6036. P. 1421–1425. DOI: 10.1126/science.1206731.
- Tregoning P., Burgette R., McClusky S. C., Lejeune S., Watson C. S., McQueen H. A decade of horizontal deformation from great earthquakes // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2013. V. 118. P. 2371–2381. DOI: 10.1002/jgrb.50154.
- Vasilenko N. F., Prytkov A. S., Kim C. U., Takahashi H. Coseismic deformations of the Earth's surface in Sakhalin related to the August 2, 2007, Mw = 6.2 Nevelsk earthquake // Russian J. Pacific Geology. 2009. V. 28. No. 5. P. 424–428. https://doi.org/10.1134/S1819714009050030.
- 34. Zonenshain L. P., Savostin L. A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics. 1981. V. 76. Iss. 1–2. P. 1–45. https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1.

Assessment of the impact of earthquakes on surface displacements of Sakhalin Island in 1990–2020 and the need to consider it in GNSS positioning

N. V. Shestakov^{1,4}, G. V. Nechaev^{1,4}, A. K. Kishkina^{1,7}, N. N. Titkov², A. S. Prytkov³, A. Yu. Polets³, M. D. Gerasimenko⁴, E. A. Lialiushko¹, A. S. Ten⁵, M. Guojie⁶

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok 690922, Russia E-mail: shestakov.nv@dvfu.ru

² Kamchatka Branch of the Geophysical Survey RAS Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia E-mail: nik@emsd.ru

³ Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia E-mail: a.prytkov@imgg.ru

⁴ Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mail: henley_grange@mail.ru

⁵ Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia E-mail: alexander.s.ten@yandex.ru

⁶ Institute of Earthquake Forecasting CEA, Beijing 100036, China E-mail: mgj@ief.ac.cn

⁷ Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mail: kishkina.ako@dvfu.ru

In this paper, we study the problem of the impact of strong crustal and deep-focus earthquakes on the displacements of the earth's surface on the Sakhalin Island and the need to consider it in high-precision GNSS positioning. Sakhalin Island is a seismically active region and, at the same time, it is quite remote from the subduction zone, which, as a rule, is associated with the strongest seismic events. In the absence of dense networks of continuously operating GNSS stations within the study region, to obtain initial estimates of the horizontal and vertical coseismic displacements of the island for the period 1990–2020, we have performed numerical modeling of the fields of these displacements using the source parameters of nine earthquakes with moment magnitudes $5.8 \le Mw \le 8.3$ and hypocenter depths from ~10 to 600 km that occurred both within the island and at a considerable distance from it (several hundred kilometers). An analysis of the obtained results showed that not only small- and medium-focus earthquakes occurring within the island and its immediate vicinity, but also crustal earthquakes with Mw ≥ 8 occurring at a considerable distance in the subduction zone, as well as powerful deep-focus seismic events can lead to significant (millimeters-centimeters) coseismic displacements of

the earth's crust of Sakhalin Island. Such displacements, especially those accumulated over a long period of time, significantly affect the accuracy of determining the spatial position and speed of points of the state geodetic network of a higher order (FAGN and PGN sites) and should be taken into account in high-precision GNSS determinations, and can also be used to refine the stress-strain state of the geoenvironment and ensuring safe operation of extended linear facilities located in the study region.

Keywords: GNSS-positioning, coordinate system, state geodetic network, earthquake, coseismic displacements, numerical modeling

Accepted: 05.12.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-113-130

References

- 1. Antonovich K. M., *Ispol'zovanie sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii. V 2 t.* (Satellite radio navigation systems application in geodesy: In 2 vol.), Moscow: FGUP "Kartgeotsentr", 2005, Vol. 1, 334 p. (in Russian).
- Basmanov A. V., Results geodetic monitoring geodynamic polygons for measurements Rosreestr 2015, *Proc. InterExpo GEO-Siberia-2016, XII Intern. Scientific Congress and Exhibition, Plenary Session*, Novosibirsk, 18–22 Apr., 2016, Novosibirsk: SSUGT, 2016, pp. 9–15 (in Russian).
- 3. 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., Unified Geodynamic Observation Network of the FEB RAS: formation, ten years of development, main achievements, *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2020, No. 3, pp. 5–24 (in Russian), DOI: 10.37102/08697698.2020.211.3.001.
- 4. Gabsatarov Yu. V., *Kinematika mikroplit v severo-vostochnoi Azii: Diss. kand. fiz.-mat. nauk* (Kinematics of microplates in northeast Asia (Moscow), Cand. phys.-math. sci. thesis), Moscow: 2015, 193 p. (in Russian).
- 5. *GOST 32453-2017. Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Sistemy koordinat. Metody preobrazovanii koordinat opredelyaemykh tochek* (GOST 32453-2017. Global navigation satellite system. Coordinate systems. Methods for transforming the coordinates of the determined points), Standartinform, 2017, 23 p. (in Russian).
- 6. Konovalov A. V., Nagornykh T. V., Safonov D. A., *Sovremennye issledovaniya mekhanizmov ochagov zemletryasenii o. Sakhalin* (Modern studies of the mechanisms of earthquake sources on Sakhalin Island), Vladivostok: Nauka, 2014, 252 p. (in Russian), https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485.
- Levin B. V., Tikhonov I. N., Kaistrechenko V. M., Kim Ch. U., Urban N. A., Andreeva M. Yu., Borisov S. A., Vasilenko N. F., Zherdeva O. A., Zlobin T. K., Zolotukhin D. E., Ivashova E. P., Ivel'skaya T. N., Kartashova O. L., Kovalev P. D., Kovalev D. P., Kovalenko N. S., Kozhurin A. I., Korolev P. Yu., Koff G. L., Levin Yu. N., Lomtev V. L., Mel'nikov O. A., Mikhailov V. I., Nagornykh T. V., Nikiforov S. P., Poplavskaya L. N., Prytkov A. S., Rudik M. I., Sasorova E. V., Sfonov D. A., Semenova E. P., Sen R. S., Solov'ev V. N., Spirin A. I., Strom A. L., Troitskaya Yu. I., Fokina T. A., Khramushin V. N., Chernov A. G., Shevchenko G. V., Shestakova O. M., *Nevel'skoe zemletryasenie i tsunami 2 avgusta 2007 goda, o. Sakhalin* (Nevelsk earthquake and tsunami August 2, 2007, Sakhalin Island), Moscow: Yanus-K, 2009, 204 p. (in Russian).
- 8. *Basic provisions on the state geodetic network of the Russian Federation*, GCINR 01-006-03, Moscow, 2004, 29 p. (in Russian).
- 9. *Parameters of the Earth in 1990 (PE-90.11), Reference document, Military Topographic Directorate of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation, Moscow, 2014. 52 p. (in Russian).*
- 10. Prytkov A. S., Vasilenko N. F., Dislocation model of the source of the 2000 Uglegorsk earthquake (Sakhalin Island), *Tikhookeanskaya geologiya*, 2006, Vol. 25, No. 6, pp. 115–122 (in Russian).
- 11. Prytkov A. S., Vasilenko N. F., Deformations of the earth's surface of Sakhalin Island according to GPS observations, *Geodinamika i tektonofizika*, 2018, Vol. 9, No. 2, pp. 503–514 (in Russian), https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0358.
- Chebrov V. N., Kugaenko Yu. A., Vikulina S. A., Kravchenko N. M., Matveenko E. A., Mityushkina S. V., Raevskaya A. A., Saltykov V. A., Chebrov D. V., Lander A. V., The deep Sea of Okhotsk earthquake on May 24, 2013 with magnitude M_W = 8.3 is the strongest seismic event off the coast of Kamchatka during the period of detailed seismological observations, *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebnonauchnyi tsentr", Ser.: Nauki o Zemle*, 2013, No. 1, Issue 21, pp. 17–24 (in Russian).
- Chebrov V. N., Kugaenko Yu. A., Abubakirov I. R., Droznina S. Ya., Ivanova E. I., Matveenko E. A., Mityushkina S. V., Ototyuk D. A., Pavlov V. M., Raevskaya A. A., Saltykov V. A., Senyukov S. L., Serafimova Yu. K., Skorkina A. A., Titkov N. N., Chebrov D. V., Zhupanovsk eathquake 30.01.2016 with

 $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, I = 6 (Kamchatka), Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr", Ser.: Nauki o Zemle, 2016, No. 1, Issue 29, pp. 5–16 (in Russian).

- 14. Shestakov N. V., Gerasimenko M. D., Okhzono M., Movements and deformations of the earth's crust in the Far East of the Russian Federation caused by the Tohoku earthquake on March 11, 2011, and their influence on the results of GNSS observations, *Geodeziya i kartografiya*, 2011, No. 8, pp. 35–43 (in Russian).
- 15. Shestakov N. V., Ohzono M., Takahashi H., Gerasimenko M. D., Bykov V. G., Gordeev E. I., Chebrov V. N., Titkov N. N., Serovetnikov S. S., Vasilenko N. F., Prytkov A. S., Sorokin A. A., Serov M. A., Kondrat'ev M. N., Pupatenko V. V., Modeling of coseismic movements of the Earth's crust initiated by the deep-focus Sea of Okhotsk earthquake on May 24, 2013, Mw = 8.3, *Doklady Akademii nauk*, 2014, Vol. 457, No. 4, pp. 1–6 (in Russian).
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X., ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophysical Research*, 2016, Vol. 121, pp. 6109–6131, http://dx.doi.org/10.1002/2016JB013098.
- 17. Apel E. V., Burgmann R., Steblov G., Vasilenko N., King R., Prytkov A., Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, Issue 11, Art. No. L11303, 5 p., https://doi.org/10.1029/2006GL026077.
- Arefiev S., Rogozhin E., Tatevossian R., Rivera L., Cisternas A., The Neftegorsk (Sakhalin Island) 1995 earthquake: a rare interplate event, *Geophysical J. Intern.*, 2000, Vol. 143, pp. 595–607, https://doi. org/10.1046/j.1365-246X.2000.00234.x.
- Ashurkov S. V., Sankov V.A., Serov M.A., Lukyanov P. Yu., Grib N. N., Bordonskii G. S., Dembelov M.G., Evaluation of present-day deformations in the Amurian Plate and its surroundings, based on GPS data, *Russian Geology and Geophysics*, 2016, Vol. 57, pp. 1626–1634, https://doi.org/10.1016/j. rgg.2016.10.008.
- Banerjee P., Pollitz F. F., Bürgmann R., Coseismic slip distributions of the 26 December 2004 Sumatra – Andaman and 28 March 2005 Nias earthquakes from GPS static offsets, *Bull. Seismological Society of America*, 2007, Vol. 97, No. 1A Suppl., pp. S86–S102, https://doi.org/10.1785/0120050609.
- Fan W., Wei S. S., Tian D., McGuire J.J., Wiens D.A., Complex and diverse rupture processes of the 2018 Mw 8.2 and Mw 7.9 Tonga-Fiji deep earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, Issue 5, pp. 2434–2448, https://doi.org/10.1029/2018GL080997.
- 22. Hiromichi T., Yuki H., Takeshi S., Manabu H., Coseismic crustal deformation from the 1994 Hokkaido-Toho-Oki earthquake monitored by a nationwide continuous GPS array in Japan, *Geophysical Research Letters*, 1995, Vol. 22, Issue 13, pp. 1669–1672, https://doi.org/10.1029/95GL01659.
- 23. Konovalov A. V., Stepnov A. A., Safonov D. A., Kozhurin A. I., Pavlov A. S., Gavrilov A. V., Manaychev K. A., Tomilev D.Ye., Takahashi H., Ichiyanagi M., The Mw = 5.8 14 August 2016 middle Sakhalin earthquake on a boundary between Okhotsk and Eurasian (Amurian) plates, *J. Seismology*, 2018, Vol. 22, Issue 4, pp. 943–955, https://doi.org/10.1007/s10950-018-9744-y.
- 24. Matsu'ura M., Hasegawa Y., A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1987, Vol. 47, pp. 179–187, https://doi. org/10.1016/0031-9201(87)90076-8.
- 25. Okada Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismological Society of America*, 1992, Vol. 82, No. 2, pp. 1018–1040, https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018.
- 26. Pollitz F., Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth, *Geophysical J. Intern.*, 1996, Vol. 125, Issue 1, 14 p., https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x.
- Prytkov A. S., Safonov D. A., Polets A. Y., Model of the Source of the Mw = 5.8 Onor Earthquake, August 14, 2016, Sakhalin, *Russian J. Pacific Geology*, 2018, Vol. 12, Issue 5, pp. 443–449, https://doi. org/10.1134/S1819714018050093.
- 28. Reid H. F., The Elastic-Rebound Theory of Earthquakes, *Bull. Department of Geology*, 1911, Vol. 2, No. 1, pp. 413–444.
- Sanchez L., Seemuller W., Drewes H., Mateo L., Gonzalez G., da Silva A., Pampillon J., Martinez W., Cioce V., Cisneros D., Cimbar S., Long-Term Stability of the SIRGAS Reference Frame and Episodic Station Movements Caused by the Seismic Activity in the SIRGAS Region, *Reference Frames for Applications in Geosciences*, 2013, pp. 153–161, DOI: 10.1007/978-3-642-32998-2_24.
- Shestakov N. V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A. S., Bykov V. G., Gerasimenko M. D., Luneva M. N., Gerasimov G. N., Kolomiets A. G., Bormotov V. A., Vasilenko N. F., Baek J., Park P., Serov M. A., Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations, *Tectonophysics*, 2012, Vol. 524–525, pp. 76–86, https://doi. org/10.1016/j.tecto.2011.12.019.
- Simons M., Minson S. E., Sladen A., Ortega F., Jiang J., Owen S. E., Meng L., Ampuero J.-P., Wei S., Chu R., Helmberger D. V., Kanamori H., Hetland E., Moore A. W., Webb F. H., The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries, *Science*, 2011, Vol. 332, Issue 6036, pp. 1421–1425, DOI: 10.1126/science.1206731.

- 32. Tregoning P., Burgette R., McClusky S. C., Lejeune S., Watson C. S., McQueen H., A decade of horizontal deformation from great earthquakes, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, Vol. 118, pp. 2371–2381, DOI: 10.1002/jgrb.50154.
- 33. Vasilenko N. F., Prytkov A. S., Kim C. U., Takahashi H., Coseismic deformations of the Earth's surface in Sakhalin related to the August 2, 2007, Mw = 6.2 Nevelsk earthquake, *Russian J. Pacific Geology*, 2009, Vol. 28, No. 5, pp. 424–428, https://doi.org/10.1134/S1819714009050030.
- 34. Zonenshain L. P., Savostin L.A., Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia, *Tectonophysics*, 1981, Vol. 76, Issue 1–2, pp. 1–45, https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1.