



GNSS-BASED MODELING AND STUDY OF POSTSEISMIC CRUSTAL MOVEMENT OF THE MAY 24, 2013, M_w 8.3 SEA OF OKHOTSK DEEP-FOCUS EARTHQUAKE

N.V. Shestakov^{1,2}, G.V. Nechaev^{1,2}, N.N. Titkov³, D.V. Chebrov³, V.V. Pupatenko⁴,
A.S. Prytkov⁵, K.A. Nagorny¹

¹ Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russia

² Institute for Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 7 Radio St, Vladivostok, 690041, Russia

³ Kamchatka Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 9 Piip Blvd, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

⁴ Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 65 Kim Yu Chen St, Khabarovsk 680000, Russia

⁵ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1B Nauki St, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

ABSTRACT. The mechanisms of preparation and occurrence of the strongest deep-focus earthquakes with $M_w \geq 8$, as well as their surface manifestations, remain insufficiently studied because of the lack of the relevant data. There are but three seismic events of this kind which have so far been instrumentally recorded. This paper describes the identification and analysis of the changes in the characteristics of modern crustal movement of the 2013, M_w 8.3 Sea of Okhotsk deep-focus earthquake based on the data from long-term continuous geodetic-class GNSS stations in the Sea of Okhotsk region on the Kamchatka Peninsula, the Sakhalin Island, and the coast of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan. There has been found temporal stability of variations in the average annual geodetic site velocities. The coordinates of GNSS-stations do not show non-linear changes typical of strong shallow earthquakes in the initial post-seismic period. The Maxwell rheology for modeling of viscoelastic relaxation of the asthenosphere/upper mantle as a result of seismic impact allows for a first approximation to qualitatively and quantitatively reproduce the displacement patterns of GNSS-sites of the Kamchatka Peninsula observed in the initial postseismic period (2–3 years after the mainshock). After that, the model estimates of postseismic movements of the peninsula become systematically lower than the observed. The values calculated for the OKHT station motion on the western coast of the Sea of Okhotsk are in good agreement with those recorded for postseismic displacements over the entire measurement interval. The observed directions of the Sakhalin Island postseismic movements systematically deviate to the northeast from the model directions and are oriented almost orthogonally to the Kuril-Kamchatka Trench. Besides the viscoelastic relaxation process, another possible reason for this issue could be an enhanced viscous friction in the bottom of the subducting Pacific plate, leading to the intense deformation of the Sakhalin Island and the western coast of Kamchatka.

KEYWORDS: postseismic crustal movement; GNSS; the 2013 Sea of Okhotsk deep-focus earthquake; viscoelastic relaxation; Maxwell rheology

FUNDING: This research was supported by the Russian Science Foundation grant № 22-27-00599.



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Nikolay V. Shestakov, shestakov.nv@dvfu.ru

Received: December 12, 2023

Revised: March 7, 2024

Accepted: March 14, 2024

FOR CITATION: Shestakov N.V., Nechaev G.V., Titkov N.N., Chebrov D.V., Pupatenko V.V., Prytkov A.S., Nagorny K.A., 2024. GNSS-Based Modeling and Study of Postseismic Crustal Movement of the May 24, 2013, M_w 8.3 Sea of Okhotsk Deep-Focus Earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (3), 0761. doi:10.5800/GT-2024-15-3-0761

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ИНИЦИИРОВАННЫХ ГЛУБОКОФОКУСНЫМ ОХОТОМОРСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 24.05.2013 г., M_w 8.3, ПО ДАННЫМ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ

Н.В. Шестаков^{1,2}, Г.В. Нечаев^{1,2}, Н.Н. Титков³, Д.В. Чебров³, В.В. Пупатенко⁴, А.С. Прытков⁵, К.А. Нагорный¹

¹ Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, Россия

² Институт прикладной математики ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия

³ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия

⁴ Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю. Чена, 65, Россия

⁵ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

АННОТАЦИЯ. Механизмы подготовки, реализации и поверхностные проявления сильнейших глубокофокусных землетрясений с $M_w \geq 8$ все еще остаются недостаточно изученными из-за отсутствия необходимого количества измерительной информации об этих процессах. На сегодняшний день инструментально зарегистрированы только три таких сейсмических события. В настоящей работе на основе данных многолетних непрерывных ГНСС-наблюдений, полученных на пунктах геодезических сетей, расположенных в Охотоморском регионе на п-ве Камчатка, о. Сахалин, побережье Охотского и Японского морей, выявлены и проанализированы изменения характеристик современных движений земной коры, инициированные Охотоморским глубокофокусным землетрясением 2013 г., M_w 8.3. Обнаружены устойчивые во времени изменения скоростей среднегодовых движений геодезических пунктов. Авторами статьи не выявлено нелинейных изменений координат ГНСС-пунктов, характерных для сильных мелкофокусных землетрясений в начальный постсейсмический период. Моделирование процесса вязкоупругой релаксации астеносферы/верхней мантии в результате сейсмического воздействия с использованием реологии Максвелла позволяет в первом приближении качественно и количественно воспроизвести наблюдаемые в начальный постсейсмический период (2–3 года после главного толчка) смещения ГНСС-пунктов Камчатского п-ва. После этого модельные оценки постсейсмических движений полуострова становятся систематически преуменьшенными, по сравнению с наблюдаемыми перемещениями. Рассчитанные движения ГНСС-станции в п. Охотск (ОКНТ), расположенном на западном побережье Охотского моря, совпадают с ее наблюдаемыми постсейсмическими смещениями на всем интервале измерений. Направления векторов измеренных постсейсмических движений о. Сахалин систематически отклоняются к северо-востоку от модельных и направлены практически ортогонально Курило-Камчатскому желобу. Одной из возможных причин подобного эффекта, помимо процесса вязкоупругой релаксации, может быть усиление вязкого трения в нижней части погружающейся Тихоокеанской плиты, приводящее к усиленному деформированию о. Сахалин и западного побережья Камчатки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: постсейсмические движения земной коры; ГНСС; Охотоморское глубокофокусное землетрясение 2013 г.; вязкоупругая релаксация; реология Максвелла

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-27-00599.

1. ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с современными представлениями, сейсмический цикл условно подразделяется на три основные стадии [Fedotov, 1968; Scholz, 2018]: межсейсмическую (накопление упругих напряжений в земной коре за счет медленных вековых движений и сцепления литосферных плит), косейсмическую (реализация накопленной энергии в виде сейсмического события, приводящая к косейсмическим («мгновенным») смещениям земной коры [Savage, 1983]), и постсейсмическую (асейсмическое снятие напряжений в околоочаговой области [Marone et al., 1991] и релаксация геосреды после землетрясения, обуславливающие изменение наблюдаемых скоростей движений земной коры на протяжении лет, десятилетий и даже веков после сейсмического события [Suito, Freymueller, 2009]). Смещения земной коры, сопровож-

дающие все стадии сейсмического цикла, достаточно хорошо изучены методами ГНСС-позиционирования (ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы) для сильных и сильнейших мелкофокусных землетрясений с M_w 7–9. Однако подготовка, реализация и постсейсмические эффекты, порождаемые сильнейшими ($M_w > 8$) глубокофокусными землетрясениями ($H > 300$ км), все еще остаются малоизученными главным образом вследствие отсутствия достаточного количества инструментальных данных, в особенности геодезических измерений.

На сегодняшний день инструментально зарегистрированы только три глубокофокусных сейсмических события с $M_w > 8$: Боливийское землетрясение 09.06.1994 г., $M_w=8.2$, $H=631$ км; Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г., $M_w=8.3$, $H=598$ км; и землетрясение около архипелага Фиджи 19.08.2018 г., $M_w=8.2$,

$H=600$ км (USGS ANSS Comprehensive Catalog, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>). Основная часть информации об этих событиях получена сейсмологическими методами. Геодезические данные о движениях земной коры, вызванных первым землетрясением, отсутствуют из-за недостаточного развития постоянно действующих и периодически наблюдаемых ГНСС-сетей в начале 1990-х гг. Для этого сейсмического события имеются оценки только вертикальных смещений, полученные сейсмологическими методами [Ekström, 1995; Jiao et al., 1995]. Впервые косейсмические пространственные смещения земной коры, инициированные глубокофокусным землетрясением, были зарегистрированы и исследованы путем прямых геодезических измерений непосредственно после Охотоморского глубокофокусного землетрясения 2013 г. по данным российских региональных ГНСС-сетей [Shestakov et al., 2014; Steblov et al., 2014]. По результатам этих измерений были построены простые дислокационные модели очага, хорошо воспроизводящие наблюдаемые горизонтальные и вертикальные косейсмические смещения земной коры в ближней и дальней зоне относительно проекции очаговой области на земную поверхность. По данным миссии GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) были обнаружены и успешно воспроизведены при помощи численного моделирования инициированные этим землетрясением косейсмические изменения в гравитационном поле Земли [Tanaka et al., 2015; Xu et al., 2017]. Косейсмические смещения, вызванные глубокофокусным землетрясением 2018 г., произошедшим вблизи островов Фиджи, были зарегистрированы имеющей крайне неравномерную плотность островной сетью ГНСС-станций, расположенных на удалении от ~500 до 2000 км от эпицентра [Park et al., 2023]. В работе [Tanaka, 2023] моделируются и обсуждаются инициированные этим событием косейсмические изменения гравитационного поля Земли.

Насколько авторам известно, первые сообщения о возможном инструментальном обнаружении постсейсмических движений земной коры, инициированных глубокофокусным сейсмическим событием, были получены именно для Охотоморского землетрясения 2013 г. и приведены в работах [Shestakov et al., 2016; Xu et al., 2017]. Исследованию этого сейсмического события уже посвящена обширная литература отечественных и зарубежных авторов (например [Chebrova et al., 2015; Zhang et al., 2021]), однако его постсейсмические эффекты до сих пор изучены крайне слабо. В статье [Park et al., 2023] сообщается об обнаружении по данным ГНСС-измерений и результатам моделирования постсейсмических смещений земной коры, инициированных глубокофокусным землетрясением Фиджи 2018 г. Авторы этой работы приводят данные о том, что ими были получены нелинейные постсейсмические изменения плановых положений геодезических пунктов, подобные производимым сильными мелкофокусными землетрясениями в результате вязкоупру-

гой релаксации астеносферы/верхней мантии. Однако эти результаты нуждаются в проверке и уточнении в силу малой продолжительности моделируемого периода (~1.6 года до и ~1.9 года после сейсмического события), удаленности большинства станций используемой ГНСС-сети от эпицентра землетрясения и крайней неравномерности их пространственного распределения. В этой связи выявление и изучение возможных постсейсмических эффектов, инициированных Охотоморским глубокофокусным землетрясением 2013 г., приобретают особое значение для поиска и уточнения ответов на вопросы: 1) сопровождаются ли сильнейшие глубокофокусные землетрясения с $M_w > 8$ постсейсмическими смещениями земной коры; 2) в случае обнаружения таких смещений, каковы их характеристики и возможные причины.

Цель настоящей работы: поиск на основе данных многолетних непрерывных ГНСС-наблюдений и получение качественных и количественных характеристик постсейсмических движений земной коры, являющихся следствием глубокофокусного Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г., $M_w=8.3$, $H=598$ км, а также рассмотрение возможности их интерпретации на основе моделирования процесса постсейсмической вязкоупругой релаксации астеносферы/верхней мантии.

2. ГНСС-НАБЛЮДЕНИЯ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ. ПОЛУЧЕНИЕ РЯДОВ ВАРИАЦИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ГНСС-ПУНКТОВ

Для поиска и выделения возможных постсейсмических эффектов Охотоморского землетрясения 2013 г. в систематически наблюдаемых ГНСС-методами движениях земной коры Дальневосточного региона авторами статьи были получены и сопоставлены числовые характеристики таких движений до и после исследуемого сейсмического события. Для анализа были отобраны 17 пунктов непрерывных ГНСС-наблюдений, расположенных на п-ве Камчатка, о. Сахалин, западном побережье Японского и Охотского морей (рис. 1) [Bykov et al., 2020; Levin et al., 2014], наблюдения на которых начались как минимум за 2–3 года до исследуемого сейсмического события. С 2009 по май 2022 г. с использованием программного пакета GAMIT/GLOBK Ver. 10.71 в системе координат IGB14 (улучшенная версия геоцентрической системы координат ITRF2014/IGS14, <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html>) были получены ряды усредненных на суточном интервале пространственных положений всех участвовавших в анализе геодезических пунктов. Для обработки данных спутниковых наблюдений использовалась стандартная методика, включающая в себя обработку данных региональных ГНСС-сетей совместно с 15–20 станциями глобальной спутниковой сети IGS (International GNSS Service, <https://network.igs.org>) в модуле GAMIT с наложением «слабых» ограничений на координаты всех участвующих в вычислениях пунктов; объединение полученных решений с глобальными

решениями SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) в модуле GLOBK; формирование окончательного решения путем трансформирования полученных на втором шаге результатов в заданную систему координат с использованием обширного набора глобально распределенных наиболее точно и надежно определенных пунктов сети IGS, фиксирующих выбранную систему координат. Для дальнейшего анализа авторы использовали только горизонтальные компоненты временных серий координат, так как точность определения характеристик вертикальной компоненты низка.

Для дальнейшего анализа полученные серии изменений координат пунктов были разделены на фрагменты, охватывающие периоды с января 2009 по май 2013 г. и с мая 2013 по май 2022 г. и содержащие вариации положения ГНСС-станций в течение нескольких лет до момента главного толчка и все доступные данные после него. Для каждого временного промежутка и по каждой компоненте координатный ряд сначала очищался от «смещений», вызванных заменой элементов спутниковой аппаратуры, другими землетрясениями и иными факторами, не имеющими отношения к исследуемому сейсмическому событию. Для выяв-

ления таких событий использовались ведущиеся по каждой станции записи о выполняемых регламентных работах и заменах компонент спутникового оборудования; информация о произошедших в регионе землетрясениях с $M_w > 5.5$ и визуальная инспекция координатных рядов на предмет наличия связанных с ними изменений пространственного положения станции. В случае их обнаружения параметры таких сдвигов определялись независимо по каждой координатной компоненте. Величина «ступеньки» вычислялась как разность значений координат, оцененных путем аппроксимации линейной регрессией 14-суточного фрагмента ряда «до» и такого же временного интервала «после» смещения. В случае замены геодезического центра для выполнения спутниковых наблюдений элементы приведения к новому положению ГНСС-антенны рассчитывались на основе обработки и усреднения данных одновременных спутниковых наблюдений на обоих центрах продолжительностью не менее семи суток (станции APC2, KLUC, PAUJ). Далее производилась одновременная оценка параметров сезонных вариаций и среднегодовых (вековых) скоростей движения пункта, а также фильтрация грубых

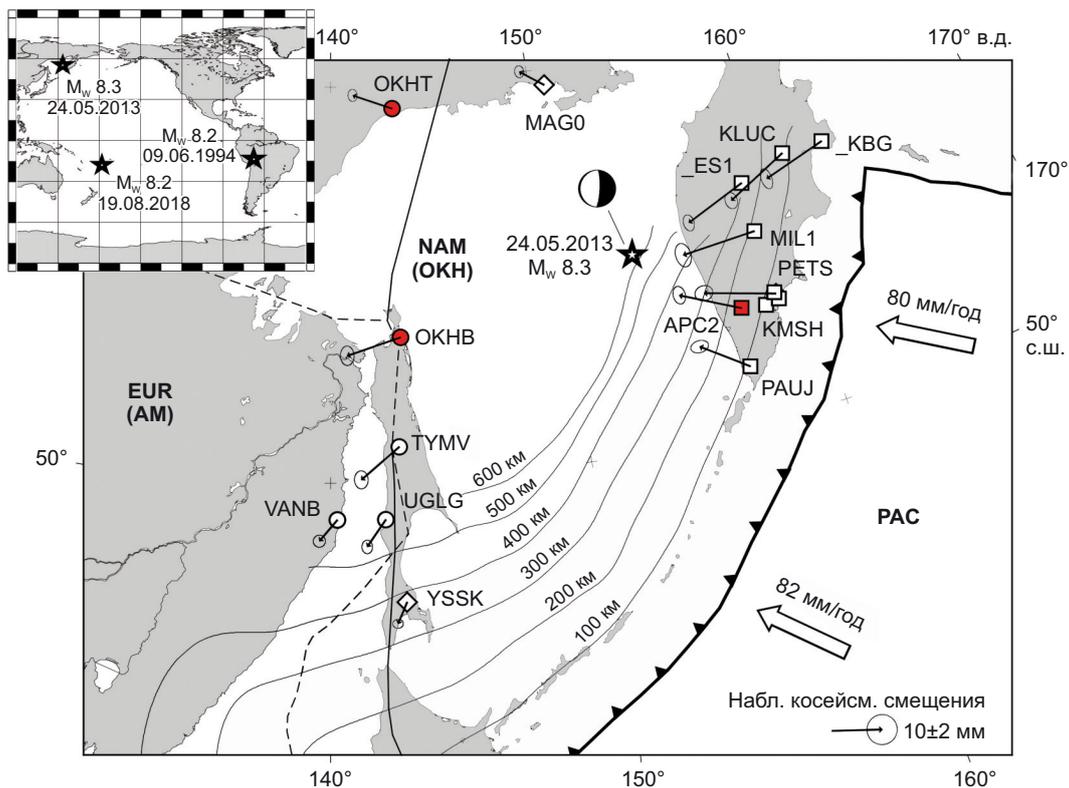


Рис. 1. Схема расположения пунктов региональных ГНСС-сетей, представленных в настоящей работе. Квадратами обозначены пункты сети KamNet [Levin et al., 2014]; кружками – пункты комплексной геодинамической сети ДВО РАН [Vykov et al., 2020]; ромбами – станции глобальной ГНСС-сети IGS. Красной заливкой выделены пункты, временные серии которых приведены на рис. 3. Заглавными буквами обозначены литосферные плиты и предполагаемые микроплиты: PAC – Тихоокеанская, EUR (AM) – Евразийская (Амурская микроплита), NAM (ОКН) – Североамериканская (Охотская микроплита). Зубчатой линией показана граница зоны субдукции (Курило-Камчатский желоб). Большими стрелками обозначена скорость движения Тихоокеанской плиты относительно Североамериканской. Тонкими стрелками показаны косейсмические смещения ГНСС-пунктов, инициированные главным толчком Охотоморского глубоководного землетрясения 24.05.2013 г., M_w 8.3 [Shestakov et al., 2014]. Эллипсы ошибок даны с 68%-ной доверительной вероятностью. Изолиниями показан контур и глубины

погружения Тихоокеанской плиты. Тонкой сплошной и пунктирной линией обозначены предполагаемые границы плит и микроплит. Звездочкой отмечен эпицентр Охотоморского глубокофокусного землетрясения по данным USGS. На врезке показано положение и магнитуды всех инструментально зарегистрированных глубокофокусных землетрясений с $M_w \geq 8$.

Fig. 1. Layout of the regional GNSS-network sites presented in this study.

Squares are KamNet GNSS-network sites [Levin et al., 2014]; circles are FEB RAS complex geodynamic network stations [Bykov et al., 2020]; rhombuses are IGS-sites. Stations whose time series are shown in Fig. 3 are highlighted in red. The main lithospheric plates and hypothesized microplates are denoted as PAC – Pacific plate, EUR (AM) – Eurasian plate (Amurian microplate), NAM (OKH) – North American plate (Okhotsk microplate). The jagged line shows the subduction zone boundary (Kuril-Kamchatka Trench). Thick arrows indicate the Pacific plate velocity relative to the North American plate. Thin arrows denote the GNSS-site coseismic displacements initiated by the mainshock of the May 24, 2013 Sea of Okhotsk, M_w 8.3 deep-focus earthquake [Shestakov et al., 2014]. The error ellipses are defined with 68 % confidence level. The isolines indicate the Pacific slab contours and subduction depth. Thin solid and dotted lines are hypothesized plate and microplate boundaries. The asterisk indicates the epicenter of the Sea of Okhotsk deep-focus earthquake reported by the USGS. The inset shows the locations and magnitudes of all instrumentally recorded deep-focus earthquakes with $M_w \geq 8$.

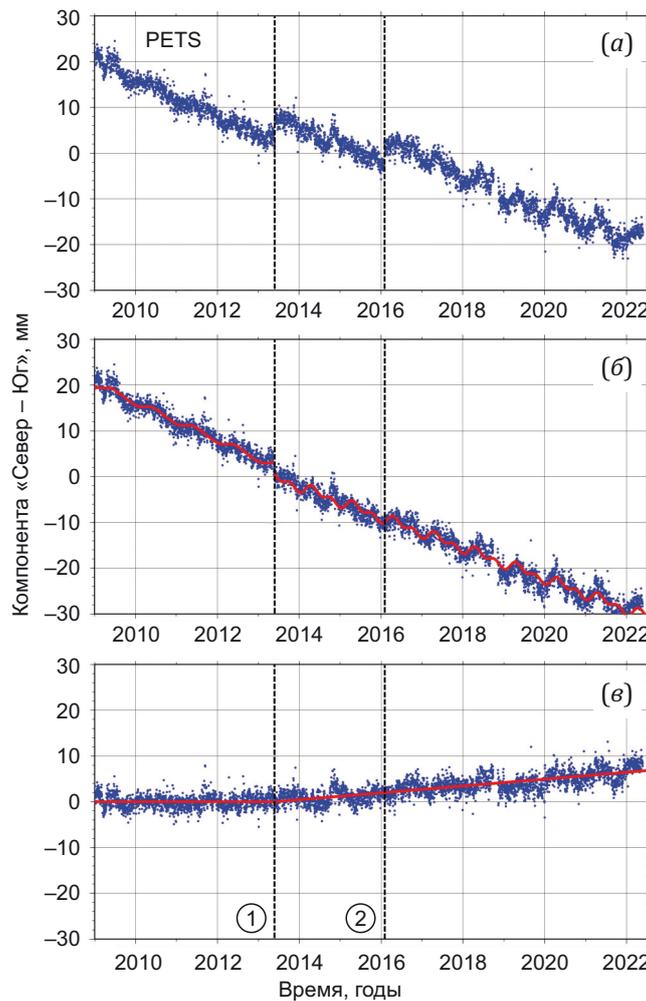


Рис. 2. Пример подготовки рядов временных вариаций координат ГНСС-пункта PETS, г. Петропавловск-Камчатский, для выявления в них возможных постсейсмических изменений и оценки их параметров.

(а) – исходный ряд временных вариаций координат по компоненте «Север – Юг»; (б) – ряд с удаленными косейсмическими смещениями, инициированными Охотоморским (24.05.2013 г., M_w 8.3, $H=598$ км, обозначено пунктирной вертикальной линией и цифрой «1») и Жупановским (30.01.2016 г., M_w 7.2, $H=177$ км, обозначено пунктирной вертикальной линией и цифрой «2») землетрясениями. Красным цветом выделена линия тренда, построенная в соответствии с выражением (1) для участков ряда «до» и «после» 24.05.2013 г.; (в) – координатный ряд с удаленным предсейсмическим трендом и сезонными вариациями.

Fig. 2. Example of the PETS (Petropavlovsk-Kamchatsky) GNSS-site coordinate time series preparation for detecting possible postseismic changes therein and estimating relevant parameters.

(а) – original coordinate time series of North–South component; (б) – time series without coseismic displacements caused by the May 24, 2013, M_w 8.3, $H=598$ km Sea of Okhotsk earthquake (shown as dotted vertical lines and number 1) and by the January 30, 2016, M_w 7.2, $H=177$ km Zhupanovsk earthquake (shown as dotted vertical lines and number 2). The red line is a trend line drawn in accordance with equation (1) for the series sections before and after May 24, 2013; (в) – time series without pre-seismic trend and seasonality.

ошибок (выбросов). Для этого каждый отрезок координатного ряда за указанный выше временной интервал аппроксимировался функцией вида:

$$y(t) = at + b + c \cdot \sin(2\pi t + d) + e \cdot \sin(4\pi t + f), \quad (1)$$

где $y(t)$ – значение координатной компоненты в эпоху наблюдений t , a – среднегодовая скорость смещения пункта, коэффициенты c и e , d и f – амплитуды и фазы сезонных вариаций координат, имеющих годичный и полугодовой период соответственно. Значения коэффициентов находились методом наименьших квадратов. Грубые ошибки выявлялись по критерию равенства или превышения среднеквадратической ошибки (СКО) значения фильтруемой координатной компоненты утроенного значения медианы СКО всего обрабатываемого фрагмента координатного ряда или как отклонение значения координатной компоненты от линии тренда, определяемой выражением (1), на эту же или большую величину. Линейный тренд, оцененный по фрагменту ряда до землетрясения, и соответствующие сезонные вариации удалялись (вычитались) из анализируемых координатных рядов. Пример результатов всех этапов обработки координатного ряда станции PETS, г. Петропавловск-Камчатский, показан на рис. 2. В Прил. 1 приведены обработанные согласно вышеописанной процедуре временные серии изменений координат всех ГНСС-станций, использованных в настоящей работе.

3. ВЫЯВЛЕННЫЕ ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Из рис. 3 и 4 видно, что координатные ряды ГНСС-станций, расположенных не только на п-ве Камчатка, но и на западном побережье Охотского моря и о. Сахалин, демонстрируют заметные устойчивые изменения линейного (векового) тренда, начинающиеся после глубокофокусного Охотоморского землетрясения 2013 г. Характеристики полученных постсейсмических изменений скоростей смещений пунктов региональных ГНСС-сетей приведены в табл. 1. Их графическое представление дано на рис. 4. Наиболее значительные изменения вековых скоростей движений наблюдаются на ближайших к эпицентру станциях APC2, MIL1 и _ES1 (расстояние от эпицентра ~350 км) и варьируются в пределах $5-7 \pm 2$ мм/год. Скорости смещений станций на о. Сахалин и пункта VANB, находящегося на противоположной стороне Татарского пролива, примерно в два раза меньше. Большинство векторов постсейсмических скоростей пунктов ориентированы в северо-западном направлении примерно перпендикулярно к простиранию границы Курило-Камчатского желоба, за исключением трех станций (KLUC, MAG0 и KMSH), характер движения которых может быть связан с локальными процессами и/или особенностями закладки геодезического центра. Например, станция KLUC находится в зоне влияния высокоактивной Ключевской группы вулканов и вулкана Шивелуч. Пункт MAG0

Таблица 1. Постсейсмические скорости перемещения ГНСС-пунктов
Table 1. Postseismic velocities of GNSS-sites

№ п/п	ГНСС-пункт	Положение пункта (широта и долгота)		Компоненты скорости пункта, мм/год	
		φ, град.	λ, град.	Север – Юг	Восток – Запад
1	_ES1	55.930	158.697	3.2±1.3	-5.3±1.4
2	_KVG	56.258	162.711	0.6±1.8	-2.8±1.4
3	KLUC	56.318	160.856	3.5±0.9	-0.4±1.4
4	MIL1	54.679	158.584	2.0±1.9	-4.9±1.6
5	APC2	52.925	157.134	2.5±1.2	-6.5±1.5
6	PETS	53.023	158.650	0.7±1.1	-4.9±1.2
7	PETR	53.067	158.607	0.3±1.6	-4.7±2.0
8	MYAK	52.889	158.707	1.0±1.1	-2.9±1.2
9	KMSH	52.827	158.131	-0.8±1.5	-2.9±1.8
10	PAUJ	51.469	156.815	0.7±1.2	-1.7±2.5
11	MAG0	59.576	150.770	0.7±1.6	0.1±1.7
12	OKHT	59.414	143.072	1.0±3.9	-2.3±4.3
13	OKHB	53.602	142.946	1.2±1.0	-1.1±1.1
14	TYMV	50.865	142.675	1.7±1.3	-2.2±1.0
15	UGLG	49.076	142.065	3.2±1.5	-2.7±1.0
16	YSSK	47.030	142.717	1.5±0.8	-2.5±0.9
17	VANB	49.091	140.255	1.2±1.0	-1.2±0.8

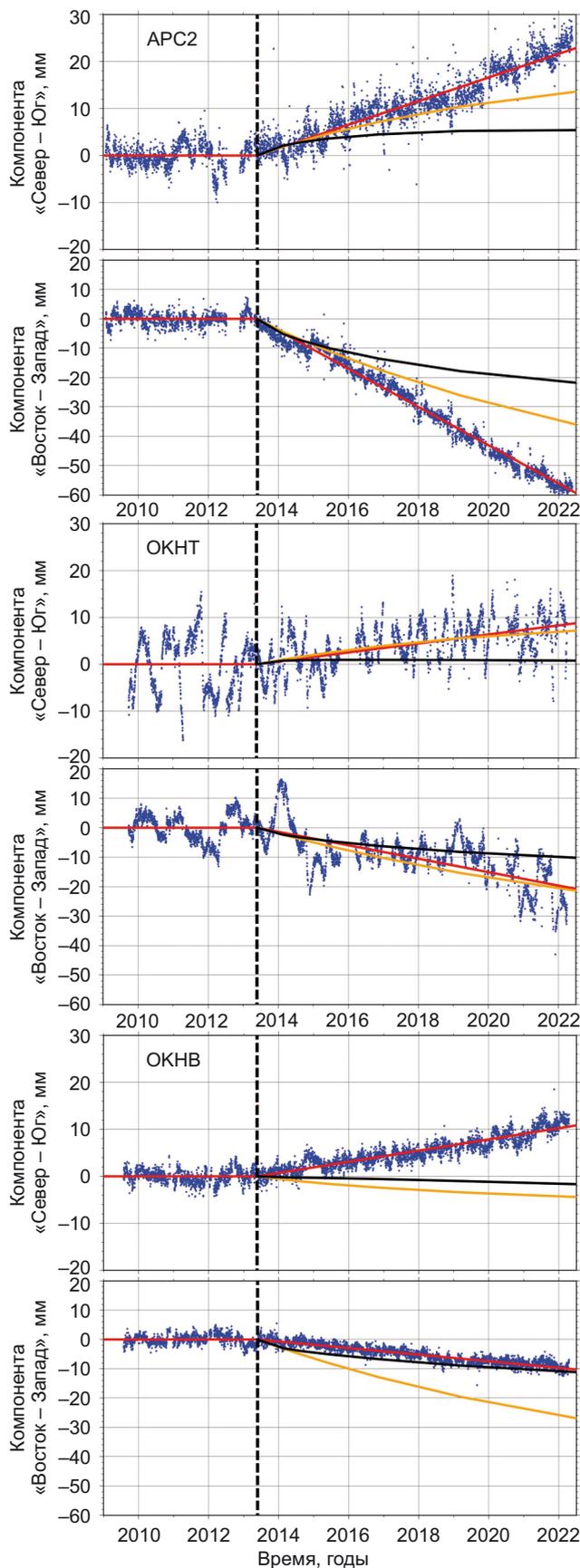


Рис. 3. Временные серии полученных по данным ГНСС-измерений и рассчитанных на основе реологических моделей вариаций плановых координат пунктов APC2, OKHT и OKNB (см. рис. 1, красные кружки). Красная линия – регрессионная прямая, аппроксимирующая вариации координат с удаленным предсейсмическим трендом. Оранжевая и черная кривые – расчетные постсейсмические изменения координат станций, полученные с использованием

реологических моделей, показанных на рис. 5. Вертикальная пунктирная линия обозначает дату главного толчка глубокофокусного Охотоморского землетрясения 2013 г.

Fig. 3. Coordinate time series obtained from the GNSS stations APC2, OKHT and OKHB (red circles in Fig. 1) and calculated using the rheological models.

The red line is a regression line approximating coordinate time series without preseismic trend. The orange and black curves are the calculated postseismic variations of station coordinates obtained from the rheological models shown in Fig. 5. The dotted vertical line shows the date of the mainshock of the 2013 Sea of Okhotsk deep-focus earthquake.

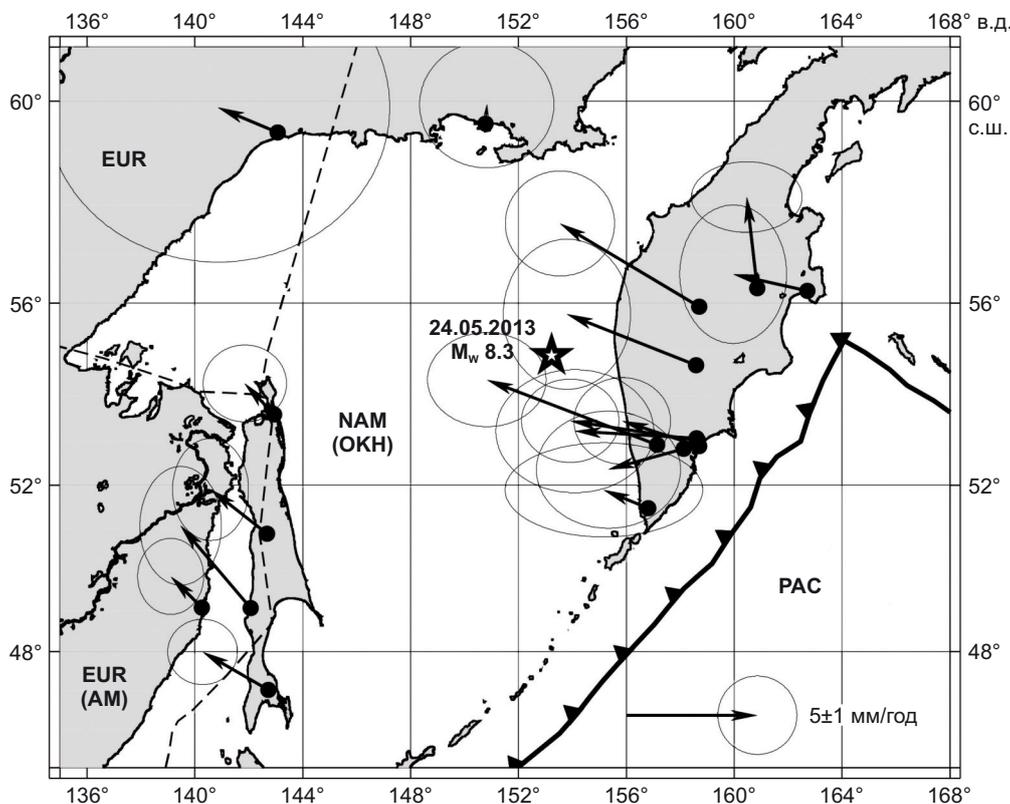


Рис. 4. Скорости постсейсмических перемещений пунктов региональных ГНСС-сетей, инициированных Охотоморским глубокофокусным землетрясением 2013 г. Эллипсы погрешностей определения скоростей даны с 68%-ной доверительной вероятностью. Остальные обозначения аналогичны соответствующим обозначениям на рис. 1.

Fig. 4. Postseismic velocities of the regional GNSS-network sites caused by the 2013 Sea of Okhotsk deep-focus earthquake. Velocity error ellipses are defined with 68 % confidence level. All other notations are identical to those in Fig. 1.

имеет короткий координатный ряд наблюдений до сейсмического события и высокоамплитудные сезонные вариации, затрудняющие надежное получение оценки его вековой скорости перемещения. Важно отметить две особенности: 1) в отличие от данных, приводимых в работе [Park et al., 2023], в обнаруженных авторами данной статьи постсейсмических изменениях скоростей перемещений геодезических пунктов отсутствует характерная для сильнейших мелкофокусных землетрясений и четко выраженная в первые недели и месяцы после главного толчка нелинейность, что также отмечалось в первых публикациях, посвященных данному событию [Shestakov et al., 2014; Steblov et al., 2014, доп. материалы]; 2) направления постсейсмических движений заметно отличаются от направлений косейсмических смещений (см. рис. 1; рис. 4). Ориентировка последних определялась направлением на эпицентр землетрясения, в то время как векторы ско-

ростей постсейсмических смещений ориентированы примерно ортогонально границе зоны субдукции. Как уже отмечалось в предыдущем разделе, качество временных серий вертикальной компоненты не позволяет использовать их для анализа, однако большинство пунктов региональных ГНСС-сетей демонстрируют тенденцию к поднятию после Охотоморского землетрясения 2013 г.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

На сегодняшний день известны и изучены с использованием геодезических данных три механизма, генерирующие постсейсмические движения, наблюдаемые после сильных и сильнейших мелкофокусных землетрясений: постсейсмический крип [Marone et al., 1991] и пороупругий отклик среды [Jonsson et al., 2003] в околоочаговой области; вязкоупругая релаксация

геосреды как реакция на сейсмическое воздействие [Sun, Wang, 2015]. Первые два механизма доминируют в ближней зоне на расстояниях порядка длины очага. Влияние криповых смещений быстро затухает с течением времени (пропорционально логарифму промежутка времени, прошедшего после главного толчка). Явление пороупругого отклика среды также наблюдается в течение первых недель и месяцев после землетрясения. Согласно многочисленным исследованиям в дальней зоне, к которой в случае глубокофокусного землетрясения относится литосфера, наибольший вклад в наблюдаемые постсейсмические движения вносит процесс вязкоупругой реакции вещества астеносферы и/или верхней мантии. Для описания этого явления используются различные реологические модели, наиболее часто состоящие из элемента Кельвина (Kelvin element – параллельно соединенные упругий и вязкий элементы) и элемента Максвелла (Maxwell element – последовательно соединенные упругий и вязкий элементы). Ключевым параметром этих моделей является вязкость моделируемой геосреды η . Для мелкофокусных сейсмических событий модель Бургерса (Burgers rheology), состоящая из последовательно соединенных элементов Максвелла и Кельвина, позволяет описать наблюдаемые непосредственно после главного толчка относительно кратковременные активные нелинейные постсейсмические процессы введением дополнительной (кельвиновской) вязкости. Модель Максвелла (Maxwell rheology), состоящая из единственного одноименного элемента, описывает долгосрочную реакцию астеносферы и/или верхней мантии в дальней зоне на протяжении лет, десятилетий и даже веков.

В силу вышеуказанных соображений, а также линейности наблюдаемых изменений тренда ГНСС-станций для моделирования постсейсмических смещений авторы статьи не рассматривали эффекты постсейсмического крипа и пороупругого отклика среды. Конструируемые далее реологические модели базируются на использовании механизма вязкоупругой релаксации геосреды и элемента Максвелла.

Для моделирования использовался программный пакет VISO2.5D [Pollitz, 2014], позволяющий рассчитывать квазистатические сейсмогенные смещения и деформации в заданной области (домене) на земной поверхности или под ней с использованием вязкоупругой двухмерной модели внутреннего строения литосферы и мантии, структура и параметры которой могут изменяться перпендикулярно простиранию очага землетрясения или границе зоны субдукции с учетом сферичности Земли. Заданная авторами область моделирования простирается на 2260 км вдоль Курило-Камчатского желоба и на 1640 км перпендикулярно к нему (рис. 5, а). В ее центре находится эпицентр землетрясения. Вертикальный профиль, задающий внутреннее строение, проходит через эпицентр перпендикулярно желобу. Азимут простирания расчетного домена равен 210°, что соответствует средней ориентации зоны субдукции в районе п-ова Камчатка. Толщи-

на погружающейся океанической литосферы (плиты) принята равной 62 км. Это значение выбрано исходя из требования вмещения плитой сейсмического источника (очага) землетрясения, который помещен в толще погружающейся плиты, а также в соответствии с оптимальными параметрами реологических моделей, рассчитанными в работе [Kogan et al., 2013], и оценками по данным сейсмической томографии, приводимыми в работе [Koulakov et al., 2011]. Угол падения слэба принят равным 44°, что также соответствует данным из последней работы. Вычисления производятся в ячейках, на которые разбита область моделирования, имеющих в проекции на земную поверхность перпендикулярно к профилю ширину от 30 км вблизи эпицентра до 150 км на периферии расчетной области и высоту в вертикальной плоскости 25 км на глубине очага (около 600 км) и 80 км вне его. Свойства среды, за исключением вязкости, выбирались согласно модели PREM [Dziewonski, Anderson, 1981]. Сейсмический источник задан дислокационной моделью с пологим падением плоскости сейсморазрыва размерами 180.5×65.0 км и однородным смещением по ней 3.3 м, построенной в работе [Shestakov et al., 2014] по данным о полученных ГНСС-методами косейсмических смещениях земной коры (см. рис. 1). Данная модель адекватно воспроизводит наблюдаемые косейсмические подвижки на пунктах региональных ГНСС-сетей.

С использованием ранее опубликованных данных о структуре и свойствах литосферы Курило-Камчатской зоны субдукции [Burgman et al., 2005; Gordeev et al., 2001; Koulakov et al., 2011] и результатов по исследованию и моделированию постсейсмических эффектов сильнейших мелкофокусных Курильских землетрясений 2006 и 2007 гг. [Steblov et al., 2010; Kogan et al., 2011, 2013; Vladimirova et al., 2020] авторами представляемой статьи был построен и протестирован ряд реологических моделей исследуемого региона. Некоторые параметры этих моделей считались известными и принимались равными их значениям, полученным в приведенных выше публикациях. Один или несколько параметров (вязкость и/или толщина одного-двух слоев в модели) определялись методом поиска по узлам сетки. Для оценки соответствия модели наблюдаемым постсейсмическим смещениям и выбора оптимальных значений определяемых параметров вычислялась величина,

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left[\left(dE_i - \widehat{dE}_i \right)^2 / \sigma_{dE_i}^2 + \left(dN_i - \widehat{dN}_i \right)^2 / \sigma_{dN_i}^2 \right],$$

где n – количество ГНСС-пунктов, используемых для моделирования и наблюдений; dE_i , dN_i и σ_{dE_i} , σ_{dN_i} – полученные из спутниковых наблюдений постсейсмические смещения на заданную эпоху (3 и 10 лет после главного толчка соответственно), по координатным компонентам «Север – Юг» и «Восток – Запад», а также их среднеквадратические ошибки. «Крышкой» обозначены вычисленные (модельные) смещения. Наилучшие результаты демонстрируют две модели. Это трехслойная модель (рис. 5, б), включающая в себя слой

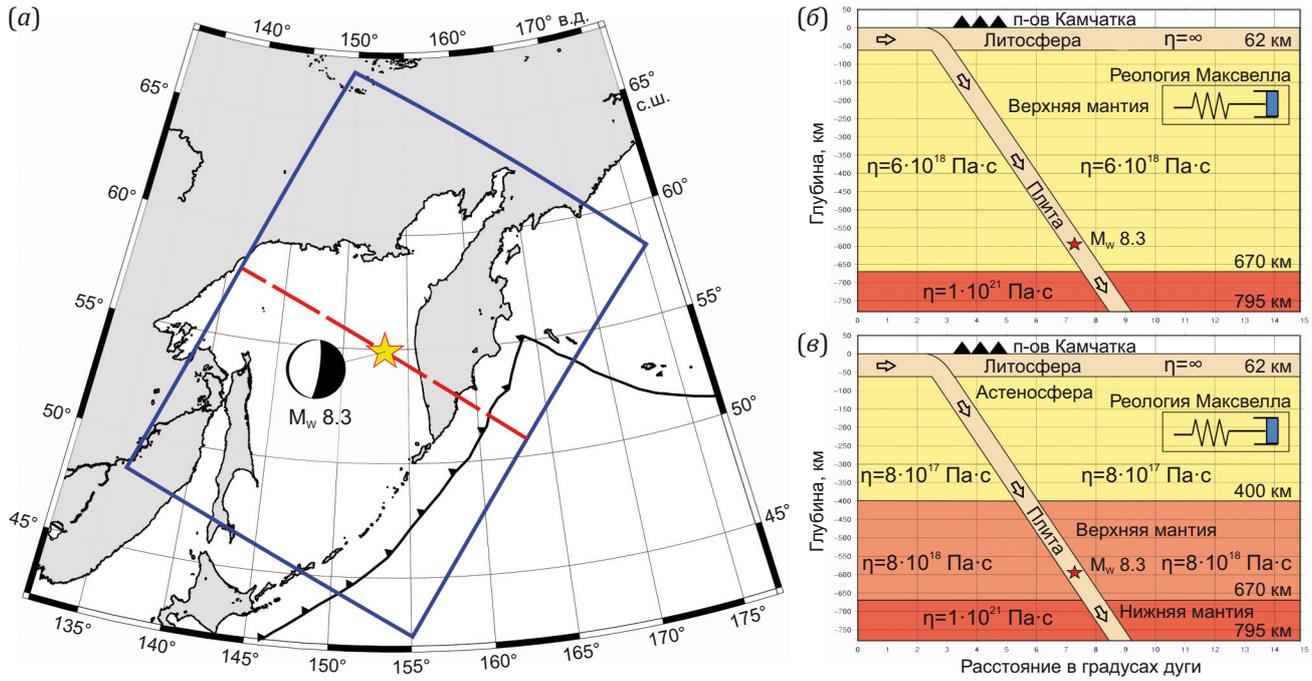


Рис. 5. Область моделирования (а) и описание рассматриваемых в работе реологических моделей (б) и (в). Проекция области моделирования на земную поверхность показана синей линией. Эпицентр землетрясения обозначен желтой звездочкой. Красная пунктирная линия – проекция профиля глубинного строения моделируемой области для рассматриваемых в работе моделей (б) и (в).
Fig. 5. Modeling domain (a) and description of the here considered rheological models (b) and (c). The blue line shows the modeling domain projection on the Earth’s surface. The earthquake epicenter is marked by a yellow asterisk. The dotted red line shows the projection of the profile reflecting the deep modeling domain structure for the here considered models (b) and (c).

литосферы толщиной 62 км, погружающийся со стороны океана под континентальную плиту до глубины 795 км. От 62 до 670 км простирается слой вязкоупругой верхней мантии, который подстилает нижняя мантия. Вязкость литосферы и нижней мантии принималась равной фиксированным значениям $\eta = \infty$ Па·с и $\eta = 1 \cdot 10^{21}$ Па·с соответственно. Вязкость верхней мантии определялась в пределах $1 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{20}$ Па·с. Вычисленное оптимальное значение η равно $6 \cdot 10^{18}$ Па·с. Полученное в рамках этой модели расчетное поле накопленных за 10 лет после главного толчка горизонтальных постсейсмических смещений всего исследуемого региона показано на рис. 6, а. На рис. 6, б, в, приведено сравнение вычисленных и накопленных за 3 и 10 лет постсейсмических смещений с их наблюдаемыми на пунктах ГНСС-сетей значениями. На рис. 3 показаны расчетные временные серии изменения плановых координат для ГНСС-станций, расположенных в наиболее характерных точках исследуемого региона.

Вторая модель (см. рис. 5, в), помимо слоя литосферы, включает в себя астеносферу (62–340 км), верхнюю мантию (340–670 км) и подстилающую ее нижнюю мантию (670–2900 км). Полученные оптимальные значения вязкости астеносферы и верхней мантии равны $8 \cdot 10^{17}$ и $8 \cdot 10^{18}$ Па·с соответственно. Толщина астеносферы также оптимизировалась и оценена равной ~340 км. На рис. 3 и 7 приведено сравнение наблюдае-

мых и модельных вариаций координат и накопленных постсейсмических смещений на станциях APC2, ОКНТ и ОКНВ соответственно.

Из рис. 3, 6, 7 видно, что обе модели позволяют в первом приближении качественно и количественно воспроизвести наблюдаемую картину постсейсмических смещений Охотоморского глубокофокусного землетрясения 2013 г. на п-ве Камчатка в начальный постсейсмический период (первые 2–3 года). После 2016 г. модельные оценки начинают расходиться с наблюдениями и получаемые оценки постсейсмических скоростей занижаются. Следует отметить, что первая модель позволяет добиться лучшего согласия с экспериментальными данными по величине векторов смещений на всем протяжении постсейсмического периода. Вторая модель дает лучшее совпадение в ориентировке модельных и наблюдаемых векторов, однако существенно занижает их величины к концу периода наблюдений и демонстрирует большую нелинейность постсейсмических изменений скоростей движения пунктов в ближней зоне. Только первая модель хорошо описывает постсейсмическое движение станции ОКНТ на протяжении всего постсейсмического периода, а также значительно лучше соответствует величинам наблюдаемых постсейсмических смещений станций на о. Сахалин. Однако направления рассчитанных с использованием обеих реологических моделей и наблюдаемых векторов

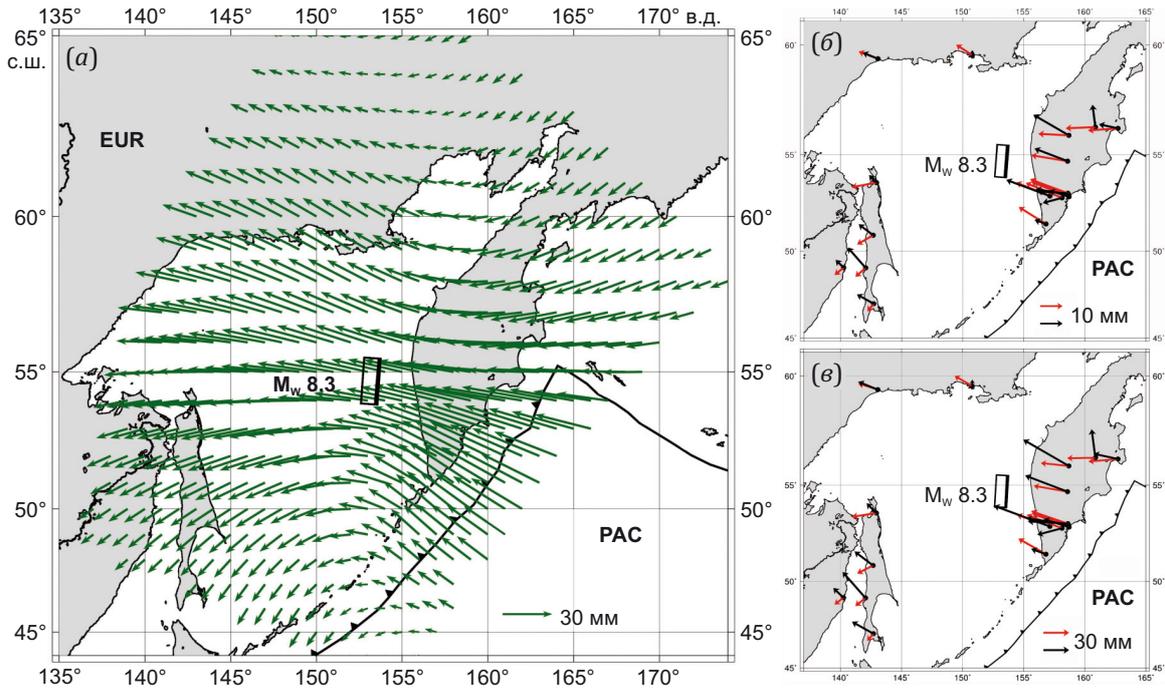


Рис. 6. Поле модельных горизонтальных постсейсмических смещений (зеленые стрелки) исследуемого региона спустя 10 лет после главного толчка, рассчитанное согласно реологической модели, структура которой показана на рис. 5, 6 (а) и сравнение вычисленных (красные стрелки) и наблюдаемых постсейсмических смещений (черные стрелки) спустя три года (б) и 10 лет (в) после землетрясения.

Прямоугольником показана проекция модели очаговой области на земную поверхность. Жирной линией выделен верхний край плоскости сейсмодислокаций. Остальные обозначения аналогичны приведенным на предыдущих рисунках обозначениям.

Fig. 6. The field of model horizontal postseismic displacements (green arrows) of the study region 10 years after the mainshock, calculated based on the rheological model whose structure is shown in Fig. 5, 6 (a), and comparison of the calculated (red arrows) and observed (black arrows) postseismic displacements 3 (б) and 10 (в) years after the earthquake.

The rectangle denotes model projection of the source area on the Earth's surface. The bold line shows the upper focal plane. All other notations are identical to those in the previous figures.

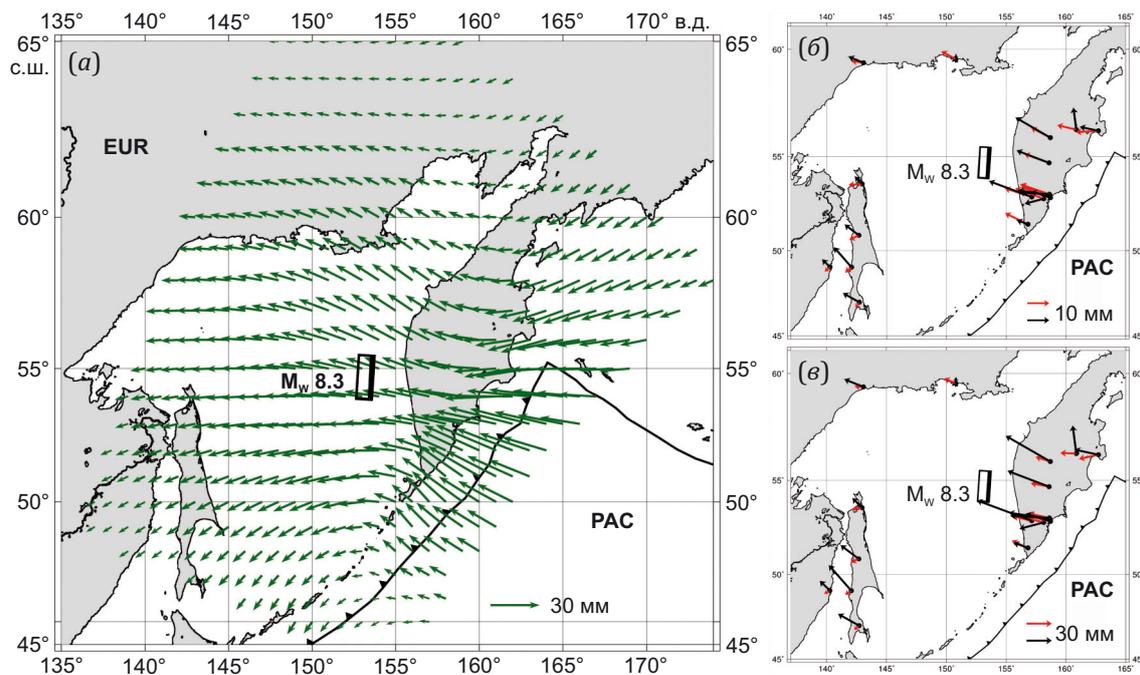


Рис. 7. Поле модельных горизонтальных постсейсмических смещений (зеленые стрелки) исследуемого региона спустя 10 лет после главного толчка, рассчитанное согласно реологической модели, структура которой показана на рис. 5, в (а) и сравнение вычисленных (красные стрелки) и наблюдаемых постсейсмических смещений (черные стрелки) спустя три года (б) и 10 лет (в) после землетрясения.

вычисленных (красные стрелки) и наблюдаемых постсейсмических смещений (черные стрелки) спустя три года (б) и 10 лет (в) после землетрясения. Все обозначения аналогичны приведенным на рис. 6 обозначениям.

Fig. 7. The field of model horizontal postseismic displacements (green arrows) of the study region 10 years after the mainshock, calculated based on the rheological model whose structure is shown in Fig. 5, в (а), and comparison of the calculated (red arrows) and observed (black arrows) postseismic displacements 3 (б) and 10 (в) years after the earthquake. All other notations are identical to those in the Fig. 6.

постсейсмических перемещений сахалинских ГНСС-станций демонстрируют заметные систематические отклонения. Направления модельных векторов на о. Сахалин значительно ближе к направлениям косейсмических смещений, в то время как наблюдаемые скорости постсейсмических движений, как уже отмечалось ранее, ориентированы приблизительно ортогонально Курило-Камчатскому желобу. Модификация параметров построенных реологических моделей, использование реологии Бюргерса не позволяют сколько-нибудь существенно улучшить согласие модельных и экспериментальных данных в целом.

5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате многолетних ГНСС-наблюдений на п-ве Камчатка, о. Сахалин и западном побережье Охотского моря были выявлены устойчивые изменения горизонтальных скоростей вековых движений земной коры, инициированные Охотоморским глубокофокусным землетрясением 2013 г., $M_w=8.3$. В отличие от результатов, приводимых в работе [Park et al., 2023], авторами не обнаружена характерная для мелкофокусных сейсмических событий нелинейность изменения координат геодезических пунктов в первые недели и месяцы после главного толчка, что может объясняться как отсутствием или малой интенсивностью процессов постсейсмического крипа и пороупругого отклика геосреды в околоочаговой области, характерной для мелкофокусных сейсмических событий аналогичной магнитуды, так и большой глубиной очага и отличиями в структуре и реологическом строении Курило-Камчатской зоны субдукции, по сравнению с характеристиками этой зоны в районе архипелага Фиджи. В работе [Park et al., 2023] анализировались очень короткие координатные ряды, что могло сказаться на точности и надежности получения параметров постсейсмических движений и позволило добиться их удовлетворительного согласия с модельными значениями.

В статьях [Burgmann et al., 2005; Steblov et al., 2008; Kogan et al., 2013] отмечается, что в Курило-Камчатском регионе не фиксируются какие-либо проявления постсейсмических процессов после сильнейшего Камчатского землетрясения 1952 г. ($M_w=9.2$, $H=22$ км), в то время как такие эффекты до сих пор наблюдаются после сейсмических событий с $M_w \geq 9$, произошедших на Аляске (1964 г.) и в Чили (1960 г.) [Suito, Freymueller, 2009; Hu et al., 2004]. Этот факт может свидетельствовать в пользу низких значений долговременной вязкости астеносферного/мантийного вещества в данном регионе. Однако полученные авторами значения вяз-

кости астеносферы и верхней мантии порядка $8 \cdot 10^{17}$ – $8 \cdot 10^{18}$ Па·с вполне сопоставимы с аналогичными оценками других авторов, приводимыми для данного региона и других районов мира, и не являются аномально низкими [Pollitz, 2005; Ohzono et al., 2012; Gunawan et al., 2014; Liu et al., 2023]. Уменьшение вязкости астеносферы/верхней мантии η в моделях авторов статьи ведет к появлению выраженной нелинейности в начале постсейсмического периода, а ее увеличение чрезмерно занижает получаемые оценки смещений. Таким образом, процесс вязкоупругой релаксации является, возможно, доминирующим, но не единственным процессом, генерирующим и поддерживающим наблюдаемые в течение девяти лет устойчивые изменения скоростей движений земной коры региона, особенно в районе о. Сахалин.

С учетом того, что полученные авторами постсейсмические движения во всем исследуемом регионе ориентированы примерно ортогонально границе зоны субдукции, таким процессом может быть увеличение скорости погружения Тихоокеанской литосферной плиты или ее части под кроющую ее Северо-Американскую плиту. Гипотеза об увеличении скорости субдукции после сильнейших коровых землетрясений с надвиговым механизмом подвижки и магнитудой $M_w \geq 8-9$ высказана и на качественном уровне обсуждается в работах [Heki, Mitsui, 2013; Yuzariyadi, Heki, 2021]. В качестве ее экспериментального подтверждения приводятся данные об увеличении направленных в сторону суши скоростей ГНСС-пунктов, расположенных на краю континентальной плиты на участках, смежных с районом, находящимся напротив проекции очаговой области землетрясения, постсейсмические движения в которой направлены к желобу. Авторы предполагают, что уменьшение сцепления океанической плиты с кроющей ее континентальной плитой в этой области после землетрясения приводит к увеличению скорости субдукции и росту каплинга на смежных участках, что проявляется как увеличение направленных в сторону суши скоростей движения геодезических пунктов в постсейсмический период.

Ускорением погружения океанической плиты и усилением каплинга в работе [Rousset et al., 2023] объясняется обнаруженное авторами кратковременное изменение скоростей станций Камчатской ГНСС-сети в апреле 2013 г., т.е. непосредственно перед главным толчком глубокофокусного Охотоморского землетрясения 2013 г. В данном случае изменение баланса действующих на Тихоокеанскую плиту сил ассоциируется с временным уменьшением вязкого трения на глубине

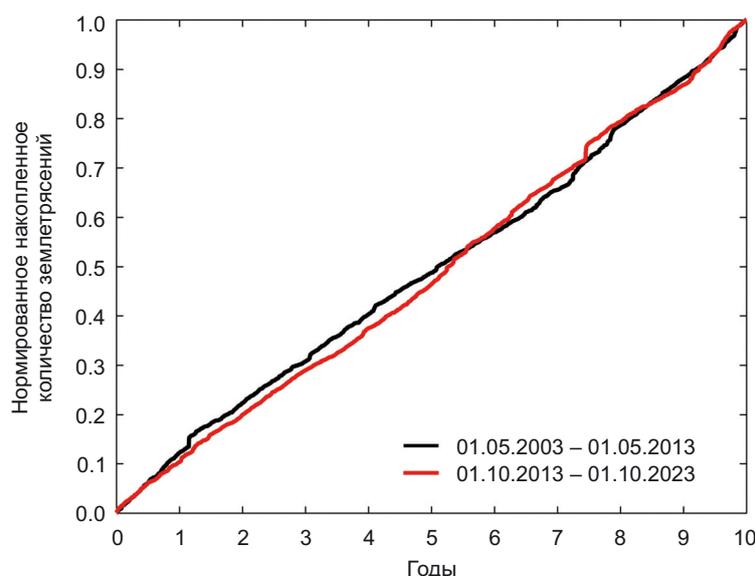


Рис. 8. Нормированное накопленное количество землетрясений в районе Камчатской сейсмофокальной зоны в течение десяти лет до и после главного толчка Охотоморского землетрясения 2013 г.

Использовался каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 – настоящее время) Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Chebrova et al., 2020]. Анализировались сейсмические события с $M_p \geq 3.5$, $K_s \geq 8.5$, $H \leq 100$ км, эпицентры которых располагались в области $50-56.5^\circ$ с.ш. и $155-164^\circ$ в.д. Период интенсивной афтершоковой активности после Охотоморского землетрясения 2013 г. исключен из рассмотрения. До главного толчка зафиксировано 4366 событий (выделившаяся энергия $4.3 \cdot 10^{15}$ Дж), после него – 4561 событие (выделившаяся энергия $6.6 \cdot 10^{15}$ Дж).

Fig. 8. Normalized accumulative number of earthquakes in the Kamchatka seismofocal zone for ten years before and after the main shock of the 2013 Sea of Okhotsk earthquake.

Use has been made of the Catalog of Earthquakes in the Region of Kamchatka and the Commander Islands (1962 – present) of the Kamchatka Branch FRS GS RAS [Chebrova et al., 2020]. Analysis has been made on seismic events with $M_p \geq 3.5$, $K_s \geq 8.5$, $H \leq 100$ km, the epicenters of which were located at $50-56.5^\circ$ N $155-164^\circ$ E. The period of intense aftershock activity after the 2013 Sea of Okhotsk earthquake is excluded from consideration. There were 4366 events recorded before the mainshock (energy release $4.3 \cdot 10^{15}$ J) and 4561 events recorded after the mainshock (energy release $6.6 \cdot 10^{15}$ J).

200–400 км и усилением сейсмичности на глубине 100–300 км в районе п-ва Камчатка. При этом ускоренное погружение в зоне сцепления плит должно приводить к усиленному деформированию земной коры и временному увеличению направленной от желоба (западной) компоненты скоростей ГНСС-пунктов, особенно на восточном побережье полуострова. Обнаруженные авторами данной работы изменения направлений векторов скоростей среднегодовых движений пунктов ГНСС-сетей Камчатского п-ва принципиально не противоречат вышеописанной гипотезе об ускорении субдукции Тихоокеанской плиты, однако их величины уменьшаются в сторону желоба, а не наоборот. Также не фиксируется существенного изменения сейсмической активности в районе зоны каплинга и на смежных территориях за десятилетний период до и после главного толчка (рис. 8). Удаленность от желоба делает маловероятным непосредственное влияние усиления каплинга в зоне субдукции на деформирование земной коры о. Сахалин. Более вероятным представляется увеличение вязкого трения более глубоких областей погружающейся океанической плиты без существенного изменения степени сцепления плит в районе желоба. Также полученные авторами отличия результатов моделирования и наблюдаемого характера постсейсми-

ческого деформирования о. Сахалин могут быть связаны с простотой используемой модели, гораздо более сложным строением области моделирования и эффектами взаимодействия Евразийской и Северо-Американской и/или предполагаемых Амурской и Охотоморской микроплит, граница между которыми, возможно, находится в данном районе.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных многолетних непрерывных ГНСС-наблюдений на пунктах геодезических сетей Охотоморского региона, п-ва Камчатка, о. Сахалин, побережья Охотского и Японского морей обнаружены устойчивые во времени постсейсмические изменения скоростей среднегодовых движений геодезических пунктов, инициированные Охотоморским глубокофокусным землетрясением 2013 г., M_w 8.3. Скорости таких перемещений достигают 5–7 мм/год в пределах п-ва Камчатка и нескольких мм/год к западу от него на о. Сахалин и западном побережье Охотского моря и Татарского пролива. Авторами не выявлено нелинейных постсейсмических изменений координат ГНСС-пунктов, характерных в первые полгода – год после главного толчка для мелкофокусных землетрясений аналогичной магнитуды. Моделирование процесса вязкоупругой релаксации

астеносферы/верхней мантии в результате сейсмического воздействия с использованием реологии Максвелла позволяет в первом приближении качественно и количественно воспроизвести наблюдаемые в начальный постсейсмический период (2–3 года после главного толчка) смещения ГНСС-пунктов Камчатского полуострова. После этого модельные оценки постсейсмических движений полуострова систематически отклоняются от наблюдаемых перемещений (оказываются преуменьшенными). Рассчитанные движения ГНСС-станции в п. Охотск (ОКНТ), расположенном на западном побережье Охотского моря, совпадают с ее наблюдаемыми постсейсмическими смещениями на всем интервале измерений. Направления векторов измеренных постсейсмических движений о. Сахалин систематически отклоняются к северо-востоку от модельных и направлены практически ортогонально Курило-Камчатскому желобу. Одной из возможных причин подобного эффекта, помимо процесса вязкоупругой релаксации, может быть усиление вязкого трения в нижней части погружающейся Тихоокеанской плиты, приводящее к усиленному деформированию о. Сахалин и западного побережья Камчатки.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов за конструктивные замечания, позволившие существенно улучшить содержание работы. Для построения рисунков частично использовался программный пакет GMT. Работа выполнена с использованием данных, полученных на УНУ «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н.В. Шестаков – концептуализация, участие в выполнении всех этапов расчетов, написание работы и ее редактирование. Г.В. Нечаев – выполнение численного моделирования, редактирование работы, участие в подготовке иллюстраций. Н.Н. Титков – программно-математическая обработка данных ГНСС-наблюдений. Остальные соавторы – предоставление данных сейсмических и ГНСС-наблюдений, редактирование и обсуждение работы.

N.V. Shestakov – conceptualization, participation in all stages of calculations, writing the work and editing it. G.V. Nechaev – performing numerical modeling, editing the work, participating in the preparation of illustrations. N.N. Titkov – processing of GNSS observation data. Other co-authors: providing seismic and GNSS observation data, editing and discussing the work.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Burgmann R., Kogan M.G., Steblou G.M., Hilley G., Levin V.E., Apel E., 2005. Interseismic Coupling and Asperity Distribution along the Kamchatka Subduction Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110 (B7), B07405. <https://doi.org/10.1029/2005JB003648>.

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. et al., 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, 5–24 (in Russian) [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. и др. Единая сеть геодинамических наблюдений ДВО РАН: становление, десять лет развития, основные достижения // Вестник ДВО РАН. 2020. № 3. С. 5–24]. <https://doi.org/10.37102/08697698.2020.211.3.001>.

Chebrova A.Yu., Chebrov V.N., Gusev A.A., Lander A.V., Guseva E.M., Mityushkina S.V., Raevskaya A.A., 2015. The Impacts of the M_w 8.3 Sea of Okhotsk Earthquake of May 24, 2013 in Kamchatka and Worldwide. *Journal of Volcanology and Seismology* 9, 223–241. <https://doi.org/10.1134/S074204631504003X>.

Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenkov E.A., Chebrov D.V., 2020. Seismological Data Information System in Kamchatka Branch of GS RAS: Organization Principles, Main Elements and Key Functions. *Geophysical Research* 21 (3), 66–91 (in Russian) [Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции. Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91]. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>.

Dziewonski A.M., Anderson A., 1981. Preliminary Reference Earth Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 25 (4), 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).

Ekström G., 1995. Calculation of Static Deformation Following the Bolivia Earthquake by Summation of Earth's Normal Modes. *Geophysical Research Letters* 22 (16), 2289–2292. <https://doi.org/10.1029/95GL01435>.

Fedotov S.A., 1968. On the Seismic Cycle, the Possibility of Quantitative Seismic Zoning and Long-Term Seismicity Forecasting. In: S.V. Medvedev (Ed.), *Seismic Zoning of the USSR*. Nauka, Moscow, p. 121–150 (in Russian) [Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР / Ред. С.В. Медведев. М.: Наука, 1968. С. 121–150].

Gordeev E., Gusev A.A., Levin V.E., Bakhtiarov V.F., Pavlov V.M., Chebrov V.N., Kasahara M., 2001. Preliminary Analysis of Deformation at the Eurasia-Pacific-North America

Plate Junction from GPS Data. *Geophysical Journal International* 147 (1), 189–198. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01515.x>.

Gunawan E., Sagiya T., Ito T., Kimata F., Tabei T., Ohta Y., Meilano I., Abidin H.Z., Nurdin A.I., Sugiyanto D., 2014. A Comprehensive Model of Postseismic Deformation of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Deduced from GPS Observation in Northern Sumatra. *Journal of Asian Earth Sciences* 88, 218–229. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.03.016>.

Heki K., Mitsui Y., 2013. Accelerated Pacific Plate Subduction Following Interplate Thrust Earthquakes at the Japan Trench. *Earth Planetary Science Letters* 363, 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.12.031>.

Hu Y., Wang K., He J., Klotz J., Khazaradze G., 2004. Three-Dimensional Viscoelastic Finite Element Model for Postseismic Deformation of the Great 1960 Chile Earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 109, B12. <https://doi.org/10.1029/2004JB003163>.

Jiao W., Wallace T.C., Beck S.L., Silver P.G., Zandt G., 1995. Evidence for Static Displacements from the June 9, 1994 Deep Bolivian Earthquake. *Geophysical Research Letters* 22 (16), 2285–2288. <https://doi.org/10.1029/95GL02071>.

Jonsson S., Segall P., Pedersen R., Björnsson G., 2003. Post-Earthquake Ground Movements Correlated to Pore-Pressure Transients. *Nature* 424, 179–183. <https://doi.org/10.1038/nature01776>.

Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblov G.M., Levin B.W., Prytkov A.S., 2011. The Mechanism of Postseismic Deformation Triggered by the 2006–2007 Great Kuril Earthquakes. *Geophysical Research Letters* 38 (6), L06304. <https://doi.org/10.1029/2011GL046855>.

Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblov G.M., Prytkov A.S., Ekström G., 2013. Rapid Postseismic Relaxation after the Great 2006–2007 Kuril Earthquakes from GPS Observations in 2007–2011. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118 (7), 3691–3706. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50245>.

Koulakov I.Yu., Dobretsov N.L., Bushenkova N.A., Yakovlev A.V., 2011. Slab Shape in Subduction Zones beneath the Kurile–Kamchatka and Aleutian Arcs Based on Regional Tomography Results. *Russian Geology and Geophysics* 52 (6), 650–667. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.05.008>.

Levin V.E., Bakhtiarov V.F., Titkov N.N., Serovetnikov S.S., Magus'kin M.A., Lander A.V., 2014. Contemporary Crustal Movements (CCMS) in Kamchatka. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50, 732–751. <https://doi.org/10.1134/S1069351314060044>.

Liu T., Fu G., She Y., Meng G., Zu Z., Wu W., Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Bykov V.G., Pupatenko V.V., 2023. Post-Seismic Deformation Following the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki Earthquake and Its Impact on Northeast Asia. *Geophysical Journal International* 235 (2), 1479–1492. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad314>.

Marone C.J., Schotz C.H., Bilham R., 1991. On the Mechanics of Earthquake Afterslip. *Journal of Geophysical Re-*

search: *Solid Earth* 96 (B5), 8441–8452. <https://doi.org/10.1029/91JB00275>.

Ohzono M., Ohta Y., Iinuma T., Miura S., Muto J., 2012. Geodetic Evidence of Viscoelastic Relaxation after the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake. *Earth, Planets and Space* 64, 759–764. <https://doi.org/10.5047/eps.2012.04.001>.

Park S., Avouac J.-P., Zhan Z., Gualandi A., 2023. Weak Upper-Mantle Base Revealed by Postseismic Deformation of a Deep Earthquake. *Nature* 615, 455–460. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05689-8>.

Pollitz F.F., 2005. Transient Rheology of the Upper Mantle beneath Central Alaska Inferred from the Crustal Velocity Field Following the 2002 Denali Earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110 (B8), B08407. <https://doi.org/10.1029/2005JB003672>.

Pollitz F.F., 2014. Post-Earthquake Relaxation Using a Spectral Element Method: 2.5-D Case. *Geophysical Journal International* 198 (1), 308–326. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu114>.

Rousset B., Campillo M., Shapiro N.M., Walpersdorf A., Titkov N., Chebrov D.V., 2023. The 2013 Slab-Wide Kamchatka Earthquake Sequence. *Geophysical Research Letters* 50 (4), e2022GL101856. <https://doi.org/10.1029/2022GL101856>.

Savage J.C., 1983. A Dislocation Model of Strain Accumulation and Release at a Subduction Zone. *Journal of Geophysical Research* 88, 4984–4996. <https://doi.org/10.1029/JB088iB06p04984>.

Scholz C.H., 2018. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press, Cambridge, 493 p. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>.

Shestakov N., Nechaev G., Titkov N., Gerasimenko M., Bykov V., Pupatenko V., Serovetnikov S., Prytkov A. et al., 2016. Have the Postseismic Motions Due to the May 24, 2013 M_w 8.3 Okhotsk Deep Focus Earthquake Been Discovered by the Russian Far East GNSS Networks? In: *Understanding Active Subduction Processes in North Pacific Arcs. Proceedings of 9th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes (JKASP 2016) (May 31 – June 3, 2016)*. Fairbanks, USA, p. 65.

Shestakov N.V., Ohzono M., Takahashi H., Gerasimenko M.D., Bykov V.G., Gordeev E.I., Chebrov V.N., Titkov N.N. et al., 2014. Modeling of Coseismic Crustal Movements Initiated by the May 24, 2013, M_w 8.3 Okhotsk Deep Focus Earthquake. *Doklady Earth Sciences* 457, 976–981. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1408008X>.

Steblov G.M., Ekström G., Kogan M.G., Freymueller J.T., Titkov N.N., Vasilenko N.F., Nettles M., Gabsatarov Yu.V., Prytkov A.S., Frolov D.I., Kondratyev M.N., 2014. First Geodetic Observations of a Deep Earthquake: The 2013 Sea of Okhotsk M_w 8.3, 611 km-Deep, Event. *Geophysical Research Letters* 41 (11), 3826–3832. <https://doi.org/10.1002/2014GL060003>.

Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I., 2008. Spatially Linked Asperities of the 2006–2007 Great Kuril Earthquakes Revealed by GPS. *Geophysical Research Letters* 35, 22. <https://doi.org/10.1029/2008GL035572>.

Steblov G.M., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Prytkov A.S., Grekova T.A., 2010. Dynamics of the Kuril Kamchatka Subduction Zone from GPS Data. *Izvestiya Physics of the Solid Earth* 46, 440–445. <https://doi.org/10.1134/S1069351310050095>.

Suito H., Freymueller J.T., 2009. A Viscoelastic and Afterslip Postseismic Deformation Model for the 1964 Alaska Earthquake. *Journal of Geophysical Research* 114, B11. <https://doi.org/10.1029/2008JB005954>.

Sun T., Wang K., 2015. Viscoelastic Relaxation Following Subduction Earthquakes and Its Effects on Afterslip Determination. *Journal of Geophysical Research* 120 (2), 1329–1344. <https://doi.org/10.1002/2014JB011707>.

Tanaka Y., 2023. Coseismic Gravity Changes and Crustal Deformation Induced by the 2018 Fiji Deep-Focus Earthquake Observed by GRACE and GRACE-FO Satellites. *Remote Sensing* 15 (2), 495. <https://doi.org/10.3390/rs15020495>.

Tanaka Y., Heki K., Matsuo K., Shestakov N.V., 2015. Crustal Subsidence Observed by GRACE after the 2013 Okhotsk Deep-Focus Earthquake. *Geophysical Research*

Letters 42 (9), 3204–3209. <https://doi.org/10.1002/2015GL063838>.

Vladimirova I.S., Lobkovsky L.I., Gabsatarov Yu.V., Steblov G.M., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Prytkov A.S., 2020. Patterns of the Seismic Cycle in the Kuril Island Arc from GPS Observations. *Pure and Applied Geophysics* 177, 3599–3617. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02495-z>.

Xu C., Su X., Liu T., Sun W., 2017. Geodetic Observations of the Co- and Post-Seismic Deformation of the 2013 Okhotsk Sea Deep-Focus Earthquake. *Geophysical Journal International* 209, 1924–1933. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx123>.

Yuzariyadi M., Heki K., 2021. Enhancement of Interplate Coupling in Adjacent Segments after Recent Megathrust Earthquakes. *Tectonophysics* 801, 228719. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228719>.

Zhang H., van der Lee S., Bina C.R., Ge Z., 2021. Deep Dehydration as a Plausible Mechanism of the 2013 Mw 8.3 Sea of Okhotsk Deep-Focus Earthquake. *Frontiers in Earth Science* 9, 521220. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.521220>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

ВРЕМЕННЫЕ СЕРИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛАНОВЫХ КООРДИНАТ ГНСС-ПУНКТОВ
С УДАЛЕННЫМИ СМЕЩЕНИЯМИ, СЕЗОННЫМИ ВАРИАЦИЯМИ, ПРЕДСЕЙСМИЧЕСКИМ ТРЕНДОМ

GNSS SITE COORDINATE TIME SERIES
WITHOUT DISPLACEMENTS, SEASONALITY AND PRESEISMIC TREND

