



**METHODOLOGY OF COSEISMIC DISPLACEMENTS COMBINATION OBTAINED
BY DATA STEMMING FROM HETEROGENEOUS GEODETIC NETWORKS:
ON THE EXAMPLE OF THE GREAT 2011 TOHOKU EARTHQUAKE, Mw 9.1**

N.V. Shestakov ^{1,2}, **M.D. Gerasimenko** ², **A.K. Kishkina** ^{1✉}, **V.G. Bykov** ³, **V.V. Pupatenko** ³,
A.S. Prytkov ⁴, **N.F. Vasilenko** ⁴, **V.S. Zhizherin** ⁵, **S.V. Yakovenko** ⁶

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

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

³ Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 65 Kim Yu Chen St, Khabarovsk 680000, Russia

⁴ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1B Nauki St, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

⁵ Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Relochniy ln, Blagoveshchensk 675000, Russia

⁶ Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 43 Baltiyskaya St, Vladivostok 690041, Russia

ABSTRACT. The strongest earthquakes with magnitudes Mw 8–9 generate coseismic displacements of the Earth's crust, covering entire regions of the world. These displacements can be recorded using observations provided by the independent geodetic GNSS networks. The data of these networks are processed using different algorithms and methods for analyzing satellite observations, methods for calculating the coseismic shift, and different implementations of the coordinate system. These factors lead to "inconsistency" of the combined displacement fields and the appearance of additional errors in the results of coseismic effects modeling. The paper proposes a method for combining the fields of coseismic displacements of the Earth's crust, obtained in the far-field zone from the source according to data from heterogeneous GNSS networks. The results of applying the proposed method are demonstrated by the example of combining the fields of coseismic displacements in China, South Korea and the south of the Far East of the Russian Federation, initiated by the catastrophic Tohoku earthquake on March 11, 2011, Mw 9.1, as well as the calculation and analysis of the unified field of coseismic deformations of the region under study.

KEYWORDS: coseismic displacements; the Great 2011 Tohoku earthquake; transformation; coordinate systems; GNSS; crustal deformations

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



EDN: HQCNAT

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Anastasia K. Kishkina, kishkina.ako@dvfu.ru

Received: May 12, 2023

Revised: August 2, 2023

Accepted: August 14, 2023

FOR CITATION: Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Kishkina A.K., Bykov V.G., Pupatenko V.V., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Zhizherin V.S., Yakovenko S.V., 2024. Methodology of Coseismic Displacements Combination Obtained by Data Stemming from Heterogeneous Geodetic Networks: on the Example of the Great 2011 Tohoku Earthquake, Mw 9.1. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (1), 0736. doi:10.5800/GT-2024-15-1-0736

МЕТОДИКА ОБЪЕДИНЕНИЯ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ РАЗНОРОДНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ: НА ПРИМЕРЕ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ 11.03.2011 г., Mw 9.1

Н.В. Шестаков^{1,2}, М.Д. Герасименко², А.К. Кишкина¹, В.Г. Быков³, В.В. Пупатенко³,
А.С. Прытков⁴, Н.Ф. Василенко⁴, В.С. Жижерин⁵, С.В. Яковенко⁶

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

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

³ Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю. Чена, 65, Россия

⁴ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

⁵ Институт геологии и природопользования ДВО РАН, 675000, Благовещенск, пер. Речной, 1, Россия

⁶ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия

АННОТАЦИЯ. Сильнейшие землетрясения с магнитудой Mw 8–9 порождают косейсмические смещения земной коры, охватывающие целые регионы мира и регистрируемые по наблюдениям в независимых геодезических ГНСС-сетях. Данные этих сетей обрабатываются с применением разных алгоритмов и методик анализа спутниковых наблюдений, способов расчета косейсмического смещения, реализаций системы координат. Эти факторы приводят к «несогласованности» объединяемых полей смещений и появлению дополнительных ошибок в результатах моделирования косейсмических эффектов. В работе предлагается методика объединения полей косейсмических смещений земной коры, полученных в дальней относительно очага зоне по данным разнородных ГНСС-сетей. Результаты применения предлагаемой методики продемонстрированы на примере объединения полей косейсмических смещений территории Китая, Южной Кореи и юга Дальнего Востока Российской Федерации, инициированных катастрофическим землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г., Mw 9.1, а также расчета и анализа единого поля косейсмических деформаций исследуемого региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: косейсмические смещения; землетрясение Тохоку 2011 г.; трансформирование; системы координат; ГНСС; деформации земной коры

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования, посвященные изучению сильнейших землетрясений начала XXI в. – Суматра-Андаманского (26.12.2004 г., Mw 9.1), Чилийского (27.02.2010 г., Mw 8.8), Тохоку (11.03.2011 г., Mw 9.1) и Охотоморского глубокофокусного землетрясения (24.05.2013 г., Mw 8.3), показали, что инициированные такими сейсмическими событиями непосредственно после главного толчка смещения и деформации земной коры, называемые косейсмическими, могут охватывать огромные территории, площадь в миллионы квадратных километров [Tregoning et al., 2013; Shestakov et al., 2014]. Основным способом регистрации и изучения таких движений являются методы ГНСС-позиционирования, которые позволяют определять их величины с точностью от субдециметра до нескольких сантиметров в режиме реального времени [Fratarcangeli et al., 2018] и с ошибками порядка нескольких миллиметров при ретроспективном анализе. Информация о косейсмических смещениях чрезвычайно важна для моделирования физики и динамики развития различных процессов в очагах мощных землетрясений, определения величин и направлений смещений морского дна в случае подводного сейсмического события и принятия решения о его цунамигенности,

моделирования волн цунами, а также разработки и функционирования систем раннего предупреждения о них [Blewitt et al., 2009], расчета и анализа деформаций земной коры, а также параметров других косейсмических эффектов и процессов. В силу больших размеров области, охватываемой косейсмическими подвижками при сильнейших землетрясениях, они не могут быть зарегистрированы с достаточной полнотой и пространственным разрешением с использованием только одной геодезической ГНСС-сети глобального, например сеть IGS (<https://network.igs.org/>), или регионального (национального) масштаба, например таких, как сеть GEONET, Япония [Takamatsu et al., 2023], сеть СМОНОС, Китай [Wang, Shen, 2020], Камчатская ГНСС-сеть [Levin et al., 2014] и Байкало-Монгольская ГНСС-сеть [Lukhnev et al., 2010] РФ и другие подобные геодинамические сети. В связи с этим для решения перечисленных выше задач необходима совместная математическая обработка данных двух и более независимых геодезических сетей, что возможно далеко не всегда, так как в обширных ГНСС-сетях такая обработка сложна и требует больших затрат вычислительных и временных ресурсов. Кроме того, получение исходных данных спутниковых измерений обычно сопряжено с труднопреодолимыми бюрократическими

формальностями, в то время как результаты обработки – оценки косейсмических смещений – публикуются открыто в научной печати. Таким образом, наиболее простой и обеспечивающий достаточную точность получаемых результатов путь – объединение независимо полученных полей (групп) косейсмических смещений, которое не может быть выполнено простым сведением подвижек в одну таблицу, как поступают многие авторы, поскольку математическая обработка ГНСС-данных в независимых геодезических сетях выполняется с применением различающихся алгоритмов и методик анализа спутниковых данных, способов расчета косейсмических смещений, разных реализаций системы координат и т.д. Это приводит к появлению дополнительных ошибок в результатах моделирования геофизических процессов и явлений из-за «несогласованности» объединяемых полей смещений. Например, приводимые в публикациях [Banerjee et al., 2005; Hashimoto et al., 2006] оценки косейсмических подвижек, инициированных катастрофическим Суматро-Андаманским землетрясением на более чем десяти пунктах ГНСС-сети IGS, демонстрируют существенное (до 7 мм по абсолютной величине) различие величин их плановых компонент. С учетом того, что величины смещений в дальней относительно очага землетрясения зоне, регистрируемые на расстояниях от нее от нескольких сотен до тысячи километров и более, редко превосходят 10–20 мм, такие различия в оценках смещений могут заметно повлиять на результаты моделирования параметров очага землетрясения, оценку его магнитуды и другие интересующие специалистов параметры.

В данной работе предлагается методика объединения (комбинирования) независимо полученных полей косейсмических смещений земной коры в дальней относительно очага сильного землетрясения зоне, минимизирующая различия между ними. Эффективность методики иллюстрируется на примере получения объединенного поля косейсмических подвижек и деформаций юго-восточной части Евразийского континента, инициированных землетрясением Тохоку 11.03.2011 г.

2. МЕТОДИКА КОМБИНИРОВАНИЯ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ

Преобразование Гельмерта наиболее часто используется для трансформирования координат и скоростей смещений геодезических пунктов из одной пространственной прямоугольной системы координат в другую. В данной работе предлагается методика применения этого преобразования для корректного объединения косейсмических смещений, поскольку они также являются разностями координат, полученными до и после землетрясения. Каждое смещение можно рассматривать как отдельное квазиизмерение. В идеале косейсмические смещения, вычисленные на одном и том же пункте, но разными способами, должны быть одинаковы, если для их получения используется один

и тот же набор ГНСС-измерений и других исходных данных. На практике это не так вследствие причин, описанных во введении. Поскольку данные факторы, по крайней мере отчасти, закономерно воздействуют на все измерения в группе, результат такого влияния можно интерпретировать как различия между системами координат, в которых определены смещения в комбинируемых группах. Таким образом, проблема корректного комбинирования смещений сводится к задаче трансформирования их в единую систему координат, которая может быть зафиксирована совокупностью косейсмических смещений одной из объединяемых групп, имеющих наиболее надежно и точно определенные значения подвижек. Иными словами, одна из комбинируемых групп квазиизмерений выбирается «опорной», а все остальные измерения «наилучшим образом вписываются» в нее.

Кратко рассмотрим основные особенности применения преобразования Гельмерта в приложении к косейсмическим перемещениям земной поверхности. Пусть необходимо объединить две группы косейсмических смещений. Для общности рассуждений рассмотрим 3-мерный случай. Обозначим в прямоугольной пространственной геоцентрической системе координат (ГСК) вектор косейсмических подвижек *i*-го пункта сети, входящего в одну из групп объединяемых квазиизмерений, как

$$X_1^i = (dX_1^i, dY_1^i, dZ_1^i)^T,$$

а результат его преобразования в другую группу:

$$X_2^i = (dX_2^i, dY_2^i, dZ_2^i)^T,$$

где *dX*, *dY*, *dZ* – величины смещений пункта по соответствующим осям ГСК, а нижний индекс обозначает принадлежность к соответствующей группе комбинируемых смещений. При трансформировании смещений на произвольном количестве пунктов *n* размерность векторов перемещений *X*₁ и *X*₂ равна 3*n*×1. Для определения элементов вектора параметров трансформирования *θ* удобно воспользоваться выражением [Altamimi et al., 2002]:

$$X_2 = X_1 + Aθ, \tag{1}$$

где

$$θ = (T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z)^T, \tag{2}$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_0^i & -y_0^i \\ 0 & 1 & 0 & -z_0^i & 0 & x_0^i \\ 0 & 0 & 1 & y_0^i & -x_0^i & 0 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

В выражении (3) приведен блок, соответствующий *i*-му опорному пункту, а $(x_0^i, y_0^i, z_0^i)^T$ – вектор его приближенных координат в ГСК. Следует особо отметить, что масштабный коэффициент не вычисляется, поскольку ГНСС-системы обеспечивают единство масштаба в разных спутниковых сетях с достаточной для практических целей точностью.

Если определены смещения на некотором количестве «опорных» пунктов *k*≥3, входящих в обе объединяемые группы, решение системы уравнений (1) методом наименьших квадратов дает оценку:

$$\theta = (A^T P_x A)^{-1} A^T P_x (X_2 - X_1), \tag{4}$$

где P_x – весовая матрица разностей смещений на общих пунктах, входящих обе группы. От ее выбора существенно зависит результат трансформирования. В простейшем случае $P_x=I$ – единичная матрица, т.е. все квазиизмерения считаются равноточными, что, как правило, справедливо только в первом приближении. Для более корректного построения P_x используются ковариационные матрицы комбинируемых косейсмических смещений K_{x_1} и K_{x_2} , которые получают по результатам математической обработки ГНСС-измерений.

На практике смещения пунктов, как правило, определяют не в ГСК, а в некоторой локальной системе координат (ЛСК), начало которой отнесено к поверхности Земли, т.е. векторами вида

$$Y_j^i = (dN_j^i, dE_j^i, dU_j^i)^T,$$

где dN_j^i, dE_j^i, dU_j^i – величины перемещений по соответствующим осям ЛСК для i -го пункта геодезической сети, относящиеся к соответствующей комбинируемой группе $j(j=1,2)$. Начало ЛСК обычно относят к какому-либо положению пункта перед его косейсмическим смещением (рис. 1), задаваемым пространственными прямоугольными и геодезическими координатами – широтой и долготой B_0, L_0 .

Для преобразования смещений из ЛСК в ГСК используются известные выражения (см., например [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]).

Результаты преобразования существенно зависят от структуры ковариационной матрицы вектора смещений. Если используются только среднеквадратические ошибки компонент смещений пунктов, то матрица K_{y_j} будет диагональной. Если вычислены ковариации между компонентами смещения станции, то K_{y_j} будет полной. Преобразование общей ковариаци-

онной матрицы K_{y_j} из ЛСК в ГСК, состоящей из k общих пунктов, принадлежащих к группе j , производится в соответствии с известным законом распространения ковариаций.

Поскольку в выражении (4) используется разность двух групп смещений X_2-X_1 , соответствующая ковариационная матрица будет равна $K_x = K_{x_1} + K_{x_2}$, а весовая матрица получается из выражения $P_x = K_x^{-1}$.

Вышеописанная методика позволяет реализовать достаточно простой алгоритм определения параметров и выполнения трансформирования косейсмических смещений с использованием подвижек на k общих пунктах:

- 1) преобразование на общих пунктах смещений и их ковариационных матриц из ЛСК в ГСК;
- 2) формирование весовой матрицы P_x ;
- 3) построение «конфигурационной» матрицы A по формуле (3);
- 4) вычисление при помощи выражения (4) элементов вектора θ ;
- 5) трансформирование смещений одной группы в другую с использованием вычисленных на шаге 4 параметров по формуле (1). Предварительно для трансформируемых смещений, не входящих в группу k общих пунктов, необходимо выполнить шаги 1–3. Матрица A в этом случае строится уже для всех n трансформируемых пунктов;
- 6) преобразование полученных смещений и их ковариационных матриц обратно из ГСК в ЛСК. Реализующий данный алгоритм программный код, написанный для программной среды MATLAB, может быть получен по запросу у авторов.

Качество выполненного преобразования оценивается на основе анализа величин разностей значений

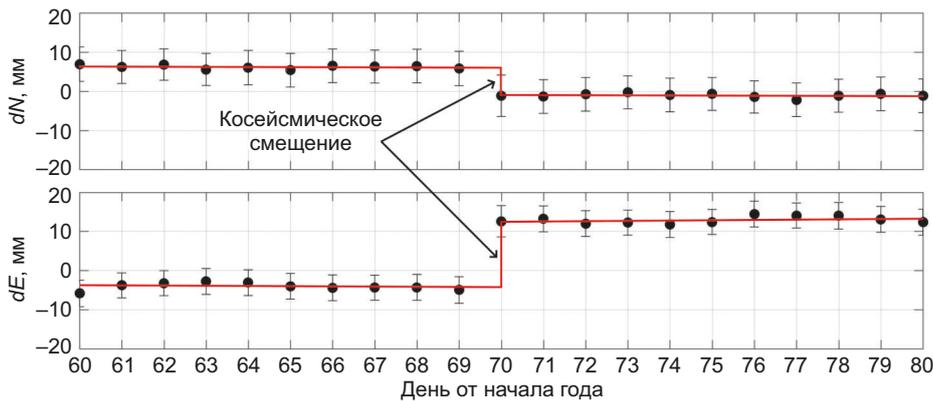


Рис. 1. Пример оценивания величин косейсмических смещений по направлениям «Север – Юг» (dN) и «Восток – Запад» (dE) в локальной системе координат, инициированных землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. (70-й день от начала года), на основе рядов среднесуточных пространственных положений ГНСС-станции «CHAN» (КНР). Планками показаны величины среднеквадратических ошибок определения координат. Красной линией дана аппроксимационная кривая, построенная по методу наименьших квадратов.

Fig. 1. The example of estimating of the values of coseismic displacements in the directions "North-South" (dN) and "East-West" (dE) in the local coordinate system, initiated by the Great 2011 Tohoku earthquake (70th day of the year), based on the series of average daily spatial positions of CHAN GNSS-station (China). The bars show the values of the root mean square errors of the coordinates. The red line denotes the approximation curve constructed by using the least squares method.

трансформированных и исходных косейсмических смещений, вычисленных на общих пунктах (невязки). Чем больше опорных пунктов использовано, тем надежнее результат трансформации. Значения невязок, как уже отмечалось, в «идеальном случае» должны быть равны нулю, но на практике достаточно, если они не будут превосходить первые миллиметры. Невязки на некоторых опорных пунктах могут значительно превышать эту величину, что может являться следствием грубых ошибок определения смещений на данной станции в одной из комбинируемых групп, а также действия ряда других факторов. Такие пункты удаляются из состава опорных, и процедура трансформирования повторяется до тех пор, пока невязки всех общих станций не достигнут приемлемого уровня.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ

Рассмотрим применение вышеописанной методики на примере объединения полей косейсмических смещений земной коры, инициированных на территории Китая, Республики Корея и в южной части Дальнего Востока России мегаземлетрясением Тохоку 11.03.2011 г., Mw 9.1, т.е. в дальней относительно очага зоне.

Изучению и моделированию горизонтальных косейсмических подвижек на территории Японских островов по данным японской геодезической ГНСС-сети GEONET посвящена обширная литература (см., например, статьи в сборниках [Pollitz et al., 2011; Iinuma et al., 2011]). Смещения от 2 до 50 мм охватили всю восточную часть Евразийского континента, включая территории Корейского полуострова, Китая, Западной Монголии, юго-востока России [Shestakov et al., 2012]. Данный регион находится под влиянием эффектов взаимодействия Евразийской, Северо-Американской, Тихоокеанской, а также удаленной Индийской литосферной плиты. Рядом исследователей предполагается, что значительная часть региона входит в состав Амурской микроплиты [Zonenshain, Savostin, 1981; Heki et al., 1999; Ashurkov et al., 2016]. Исследованию современной геодезической активности региона и кинематики Амурской микроплиты по данным ГНСС-наблюдений посвящены многие работы отечественных и зарубежных авторов (см., например [Lukhnev et al., 2010; Ashurkov et al., 2016; Wang, Shen, 2020]).

Однако получению пространственного распределения косейсмических движений земной коры на востоке Евразийского континента, расположенного на

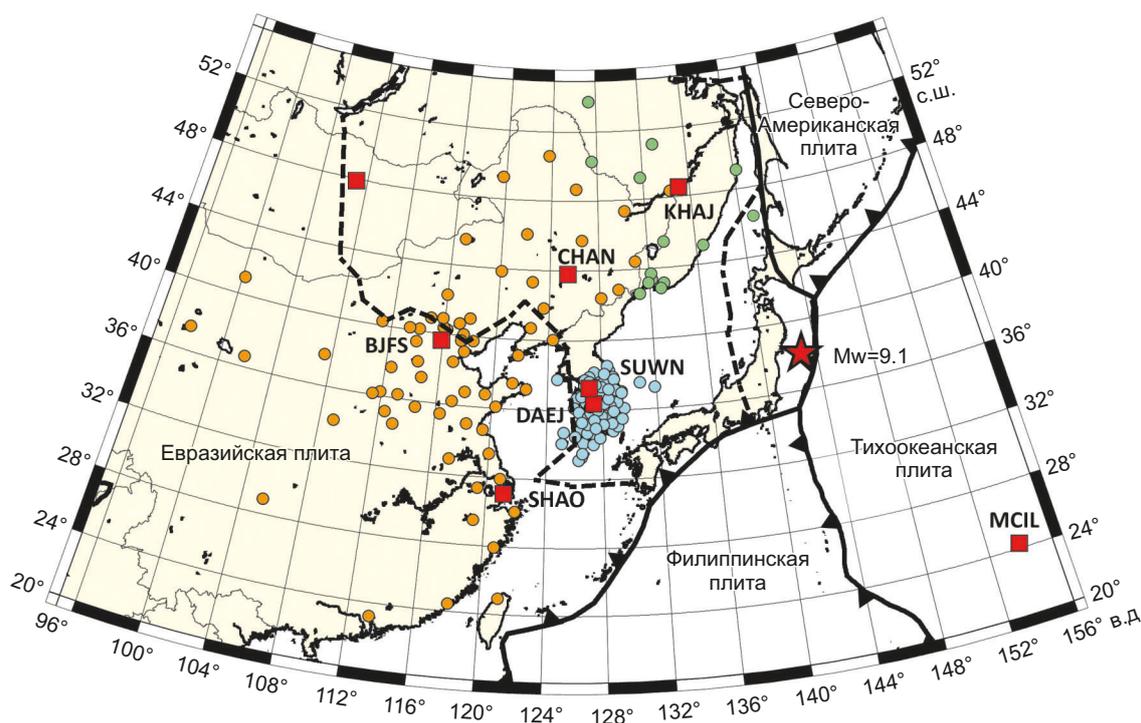


Рис. 2. Схема расположения пунктов анализируемых геодезических сетей. Зеленые кружки – российские, оранжевые – китайские, голубые – южно-корейские ГНСС-станции. Красными квадратиками показаны пункты, смещения на которых вычислены по данным двух и более спутниковых сетей (опорные пункты). Звездочкой отмечен эпицентр землетрясения Тохоку 2011 г. Черные треугольники показывают направление субдукции. Пунктирной линией обозначен один из вариантов положения границы предполагаемой Амурской микроплиты [Bird, 2003].

Fig. 2. The scheme of the analyzed geodetic networks. Green circles – Russian, orange – Chinese, blue – South Korea GNSS-stations. The red squares show the sites joined to the couple or more GNSS-networks (reference points). The asterisk marks the epicenter of the 2011 Tohoku earthquake. Black triangles indicate the direction of subduction. The dotted line denotes the boundary location of the hypothesized Amurian microplate according to [Bird, 2003].

значительном удалении от очага землетрясения Тохоку, посвящено очень ограниченное число публикаций [Wang et al., 2011; Baek et al., 2012; Shestakov et al., 2012]. В каждой из них анализируются данные программно-математической обработки отдельной ГНСС-сети, полученные с использованием разных программных средств, таких как Gamit/Globk (<http://geoweb.mit.edu/gg/>) и Bernese GNSS Software (<http://www.bernese.unibe.ch/>), несопадающих наборов исходных пунктов, фиксирующих систему координат, методик обработки спутниковых измерений и расчета косейсмических смещений на пунктах анализируемой геодезической сети. Схема расположения пунктов этих сетей представлена на рис. 2. Авторами по данным комплексной геодинимической ГНСС-сети ДВО РАН [Bykov et al., 2020], ГНСС-станции ТОИ ДВО РАН и нескольких базовых станций, принадлежащих коммерческим организациям, определены плановые косейсмические смещения юга Дальнего Востока России. В этом же решении были получены косейсмические подвижки ряда пунктов сети IGS (рис. 2). В табл. 1 приведены оценки расширенного и уточненного, по сравнению с данными из работы [Shestakov et al., 2012], набора смещений, вычисленные на пунктах, не входящих в сеть IGS. Наблюдения в геодинимической ГНСС-сети CMONOC были использованы авторами работы [Wang et al., 2011] для получения векторов косейсмических подвижек почти 80 пунктов, расположенных на территории Китая. Параметры косейсмических смещений Корейского полуострова вычислены по данным наблюдений на более чем 70 пунктах южно-корейской ГНСС-сети и приводятся в работе

[Baek et al., 2012]. Часть смещений в каждой из вышеуказанных групп также определена на одних и тех же пунктах глобальной сети IGS, расположенных в исследуемом регионе и за его пределами (рис. 2). Вертикальные перемещения в дальней зоне зарегистрированы не были, поэтому далее не рассматриваются.

По наблюдениям на общих (связующих) пунктах сети IGS и по методике, описанной в предыдущем разделе, поля косейсмических смещений на территории Дальнего Востока РФ и Южной Кореи были объединены с аналогичными данными по Китаю, выбранными в качестве «опорных», поскольку последние получены с использованием большого количества исходных пунктов (~100 глобально распределенных станций сети IGS) и расположены на гораздо более обширной территории. Комбинирование данных сети CMONOC и ГНСС-сетей, расположенных на российской территории, выполнено по набору смещений на восьми общих IGS-пунктах: BJFS, CHAN, DAEJ, KHAJ, MCIL, SHAO, SUWN, ULAB. Величины косейсмических подвижек на этих пунктах достаточно надежно определены. Вычисленные параметры трансформирования даны в табл. 2. Результаты трансформирования и смещений на опорных пунктах приведены в табл. 3, 4. Из анализа табл. 3 видно, что максимальная разница (по модулю) в величинах косейсмических смещений dS , полученных на этих пунктах авторами и китайскими специалистами, до трансформирования достигала 4.7 мм (среднее значение 3.3 мм), а после него уменьшилась до 1.2 мм (среднее значение 0.9 мм). Поле исходных и трансформированных косейсмических смещений на пунктах,

Таблица 1. Косейсмические смещения ГНСС-станций, расположенных в южной части Дальнего Востока России до и после трансформирования и их среднеквадратические ошибки

Table 1. Coseismic displacements of GNSS-stations located in the southern part of the Russian Far East before and after the transformation and their square errors

№ п/п	Наименование пункта	Положение пункта		Косейсмические смещения по плановым компонентам ЛСК			
				Исходные		Трансформированные	
				Широта	Долгота	dN , мм	dE , мм
1	ARTM	43.360°	132.196°	-20.6±2.4	35.6±2.6	-20.6±2.6	39.3±2.8
2	CHMN	51.137°	133.041°	-6.5±1.4	2.6±1.2	-6.0±2.0	6.7±2.0
3	GRNC	43.698°	132.166°	-19.0±1.4	32.4±2.0	-19.0±1.7	36.1±2.3
4	KULD	49.236°	131.738°	-7.9±1.4	6.3±1.6	-7.4±1.9	10.2±2.1
5	BLAG	50.257°	127.521°	-6.2±1.0	4.9±1.0	-5.3±1.6	8.6±1.7
6	VANB	49.091°	140.255°	-4.7±0.9	0.0±1.7	-5.1±1.8	4.4±2.4
7	ZEYA	53.757°	127.286°	-3.8±1.2	1.6±1.0	-2.4±2.0	5.4±2.0
8	SHUL	42.581°	131.157°	-15.9±2.2	37.1±2.5	-15.9±2.4	40.8±2.7
9	VLAD	43.197°	131.926°	-19.2±1.9	36.5±2.6	-19.2±2.2	40.2±2.8
10	LESZ	45.469°	133.385°	-18.8±3.4	21.7±2.7	-18.8±3.6	25.6±3.0
11	PART	43.123°	133.126°	-25.9±1.9	43.0±2.7	-26.0±2.2	46.8±2.9
12	NKHD	42.828°	132.891°	-26.0±2.1	43.8±3.1	-26.1±2.3	47.5±3.3
13	TERN	45.062°	136.601°	-33.4±6.8	20.9±7.5	-33.6±6.9	24.9±7.6
14	MONR	46.246°	141.259°	-12.5±2.9	7.7±3.6	-13.1±3.3	11.9±3.9

Таблица 2. Вычисленные параметры трансформирования в систему косейсмических смещений сети CMONOC (Китай, «SYSTEM 2») полей подвижек на пунктах российских и южно-корейских ГНСС-сетей («SYSTEM 1»)

Table 2. The calculated transformation parameters from the coseismic displacements at the stations of Russian and South Korean GNSS-networks ("SYSTEM 1") into the system of coseismic slips at CMONOC network sites (China, "SYSTEM 2")

ГНСС-СЕТЬ	UWRMS, мм	T_x , мм	T_y , мм	T_z , мм	R_x , угл. $\cdot 10^{-3}$	R_y , угл. $\cdot 10^{-3}$	R_z , угл. $\cdot 10^{-3}$
Российская	0.25	-19.0±5.4	-3.3±4.9	-15.8±5.0	0.28±0.17	0.58±0.16	-0.33±0.16
Южно-корейская	0.20	-31.0±18.5	6.0±16.2	-42.2±15.8	1.04±0.59	1.16±0.52	-0.61±0.51

Таблица 3. Плановые косейсмические смещения в ЛСК на общих пунктах для российских и китайских ГНСС-сетей

Table 3. Horizontal coseismic offsets determined in the local coordinate system at the set of common sites of the Russian and Chinese GNSS-networks

Пункт	Трансформируемые (данная работа), «Система 1»		Опорные [Wang et al., 2011], «Система 2»		Трансформированные в «Систему 2» «Система 1*»		Разности (невязки) до трансформирования «Система 2» – «Система 1»			Разности (невязки) после трансформирования «Система 2» – «Система 1*»		
	dN , мм	dE , мм	dN , мм	dE , мм	dN^* , мм	dE^* , мм	dN , мм	dE , мм	dS , мм	dN , мм	dE , мм	dS , мм
ULAB	0.6±1.3	2.0±1.3	0.0±1.5	3.0±1.5	0.7±2.1	3.4±2.1	0.6	1.0	1.2	-0.7	-0.4	0.8
CHAN	-6.2±0.9	14.9±2.6	-6.0±1.8	18.0±1.8	-5.8±1.3	18.3±2.8	0.2	3.1	3.1	-0.2	-0.3	0.3
SHAO	1.2±1.8	3.4±1.0	1.0±1.5	6.0±1.7	0.9±2.2	7.0±1.7	-0.2	2.6	2.6	0.1	-1.0	1.0
DAEJ	2.0±1.4	18.4±2.4	2.0±1.8	23.0±1.9	1.9±1.7	21.9±2.6	0.0	4.6	4.6	0.1	1.1	1.1
MCIL	6.4±1.8	-8.0±2.3	6.0±2.1	-6.0±2.3	5.6±3.2	-6.1±3.9	-0.4	2.0	2.0	0.4	0.0	0.4
BJFS	-1.4±1.3	2.9±1.0	0.0±2.1	6.0±2.1	-1.2±1.6	5.7±1.4	1.4	3.1	3.4	1.2	0.3	1.3
КНАJ	-10.8±1.1	6.3±1.5	-11.0±2.1	11.0±2.0	-10.7±1.7	10.4±2.1	-0.2	4.7	4.7	-0.3	0.6	0.7
SUWN	1.4±1.1	19.3±2.4	1.0±1.9	24.0±2.0	1.3±1.4	22.8±2.6	-0.4	4.7	4.7	-0.3	1.2	1.2
Минимальное значение (по модулю)							0.0	1.0	1.2	0.1	0.0	0.3
Максимальное значение (по модулю)							1.4	4.7	4.7	1.2	1.2	1.3
Среднее (по модулю)							0.4	3.2	3.3	0.4	0.6	0.9

Примечание. «*» – трансформированные из «Системы 1» в «Систему 2» смещения. $dS = \sqrt{dN^2 + dE^2}$.
 Note. "*" – the displacements transformed from "System 1" to "System 2". $dS = \sqrt{dN^2 + dE^2}$.

Таблица 4. Плановые косейсмические смещения в ЛСК на общих пунктах для южно-корейских и китайских ГНСС-сетей

Table 4. Horizontal coseismic offsets determined in the local coordinate system at the set of common sites of the South Korean and Chinese GNSS-networks

Пункт	Трансформируемые [Baek et al., 2012], «Система 1»		Опорные [Wang et al., 2011], «Система 2»		Трансформированные в «Систему 2» «Система 1*»		Разности (невязки) до трансформирования «Система 2» – «Система 1»			Разности (невязки) после трансформирования «Система 2» – «Система 1*»		
	dN , мм	dE , мм	dN , мм	dE , мм	dN^* , мм	dE^* , мм	dN , мм	dE , мм	dS , мм	dN , мм	dE , мм	dS , мм
BJFS	-0.1±1.5	6.9±1.3	0.0±2.1	6.0±2.1	0.0±2.4	6.0±2.2	0.1	-0.9	0.9	0.0	0.0	0.0
КНАJ	-11.2±1.3	7.6±1.2	-11.0±2.1	11.0±2.0	-10.7±2.7	10.8±2.5	0.2	3.4	3.4	-0.4	0.2	0.4
CHAN	-7.0±1.4	18.1±1.3	-6.0±1.8	18.0±1.8	-6.3±1.9	19.0±1.8	1.0	-0.1	1.0	0.3	-0.9	1.0
SHAO	1.7±1.4	6.2±1.1	1.0±1.5	6.0±1.7	0.8±2.3	6.2±2.1	-0.7	-0.2	0.7	0.2	-0.2	0.3
DAEJ	2.6±1.3	21.6±1.3	2.0±1.8	23.0±1.9	2.0±1.8	22.1±1.8	-0.6	1.4	1.5	-0.0	0.9	0.9
SUWN	1.8±1.5	23.3±1.3	1.0±1.9	24.0±2.0	1.3±1.9	23.8±1.7	-0.8	0.7	1.1	-0.3	0.2	0.4
Минимальное значение (по модулю)							0.1	0.1	0.7	0.0	0.0	0.0
Максимальное значение (по модулю)							1.0	3.4	3.4	0.4	0.9	1.0
Среднее (по модулю)							0.6	1.1	1.4	0.2	0.4	0.5

Примечание. «*» – трансформированные из «Системы 1» в «Систему 2» смещения. $dS = \sqrt{dN^2 + dE^2}$.
 Note. "*" – the displacements transformed from "System 1" to "System 2". $dS = \sqrt{dN^2 + dE^2}$.

расположенных на российской территории, показано на рис. 3, а.

Аналогичная процедура проделана в отношении данных южно-корейской ГНСС-сети и CMONOC по набору из шести общих пунктов: BJFS, CHAN, DAEJ, KHAJ, SHAO, SUWN (см. рис. 2) Согласно табл. 4, максимальная разница (по модулю) величин косейсмических смещений dS , полученных на общих пунктах в решении из работы [Baek et al., 2012] и статьи [Wang et al., 2011] до трансформирования, достигает 3.4 мм (среднее значение 1.4 мм). После преобразования она уменьшилась до 1.0 мм (среднее значение 0.5 мм). Результаты трансформирования и исходные подвиги показаны на рис. 3, б.

Из рис. 3 видно, что при объединении данные южно-корейской ГНСС-сети претерпели незначительные изменения и с большей точностью были «вписаны» в поле косейсмических смещений, полученных на территории Китая в работе [Wang et al., 2011], нежели векторы косейсмических подвижек юга российского Дальнего Востока, величины которых после трансформирования возросли от 8 до ~44 % относительно исходных значений, соответственно, для пунктов, расположенных на юге (зарегистрированы наиболее значительные смещения) и в северных и северо-восточных областях исследуемого региона (зарегистрированы малые субсантиметровые подвижки). Полученный эффект в значительной степени объясняется существенно меньшей точностью реализации системы координат в российской сети, опирающейся только на 12 пунктов глобальной сети IGS (в работах [Wang et al., 2011; Baek et al., 2012] система координат задана совокупностью ~100 IGS-станций), что подчеркивает необходимость тща-

тельного выбора исходных пунктов, использующихся для обработки ГНСС-данных, а также важность надежной фиксации системы координат при решении геодинимических задач методами космической геодезии даже в региональных масштабах.

Полученное авторами в дальней относительно очага землетрясения Тохоку зоне единое поле косейсмических движений земной коры Северо-Восточной Азии представлено на рис. 4, а его числовые характеристики приведены в Прил. 1, табл. 1.1. Эти результаты могут использоваться как исходные данные для решения широкого спектра сейсмологических и геодинимических задач, а также для исследования реологического строения литосферы Северо-Восточной Азии. В частности, авторами на их основе с использованием программного пакета GridStrain Ver. 2.0 [Teza et al., 2008] рассчитано единое поле косейсмических деформаций исследуемого региона (рис. 5). Компоненты тензора деформаций вычислялись в узлах сетки с шагом 50 км методом наименьших квадратов. Используемая методика интерполяции данных описана в работе [Shen et al., 1996]. Деформации в точках, значительно удаленных от пунктов ГНСС-наблюдений и имеющие низкий вес, не анализировались.

Полученные оси и величины главных деформаций приведены на рис. 5. Из него видно, что восточная часть Евразийского континента испытала заметное косейсмическое растяжение, более чем на порядок превышающее фоновые значения среднегодовых скоростей деформаций. Корейский полуостров, южная часть Приморского края и область их сочленения, удаленные на расстояние около 1000 км от очаговой области, демонстрируют наиболее интенсивное растяжение,

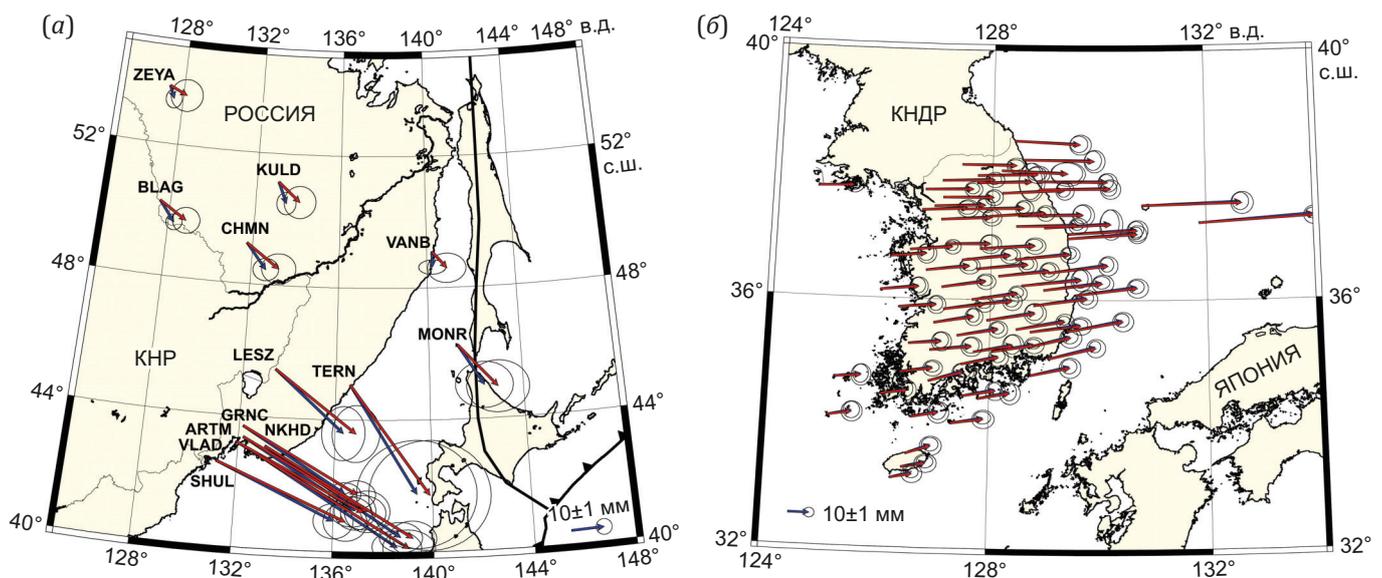


Рис. 3. Сравнение исходных (синие векторы) и трансформированных (красные векторы) косейсмических смещений на территории юга Дальнего Востока России (а) и Южной Кореи (б). Эллипсы погрешностей вычислены с 95%-ной доверительной вероятностью.

Fig. 3. Comparison of the initially observed (blue vectors) and transformed (red vectors) coseismic displacements determined on the territory of the south of the Russian Far East (a) and South Korea (b). Error ellipses were calculated with 95 % confidence level.

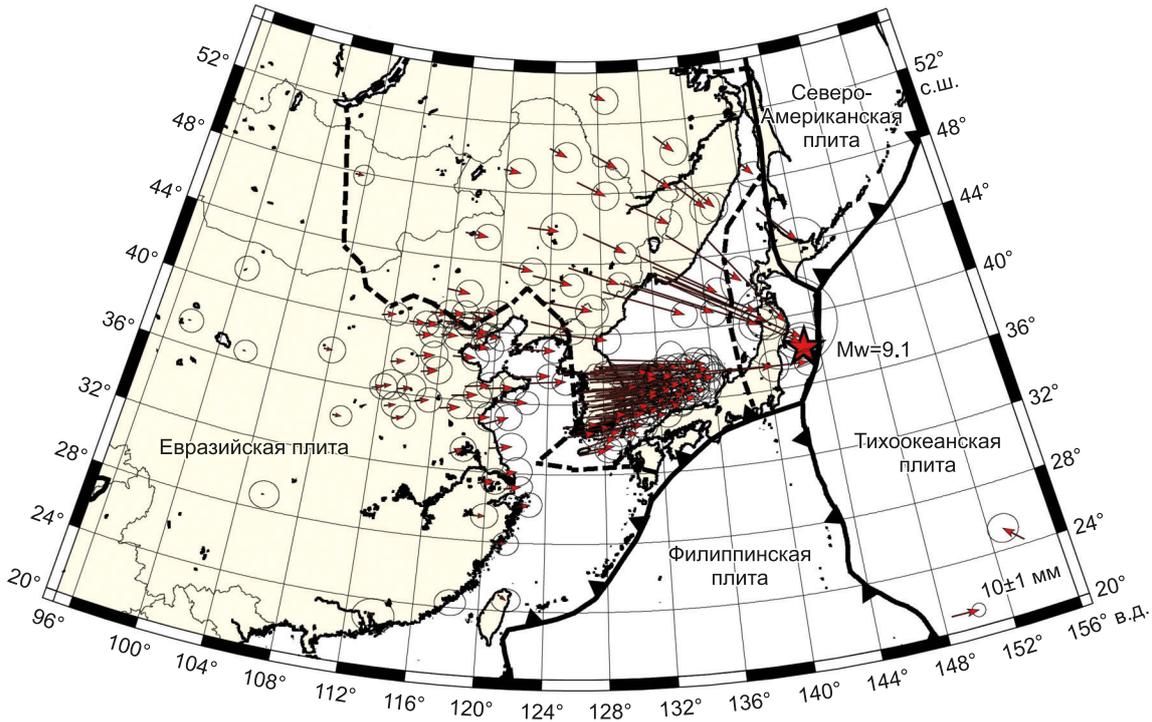


Рис. 4. Объединенное поле косейсмических смещений в дальней относительно очага землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. зоне.
Fig. 4. Combined field of coseismic displacements in the far-field zone of the 2011 Tohoku earthquake.

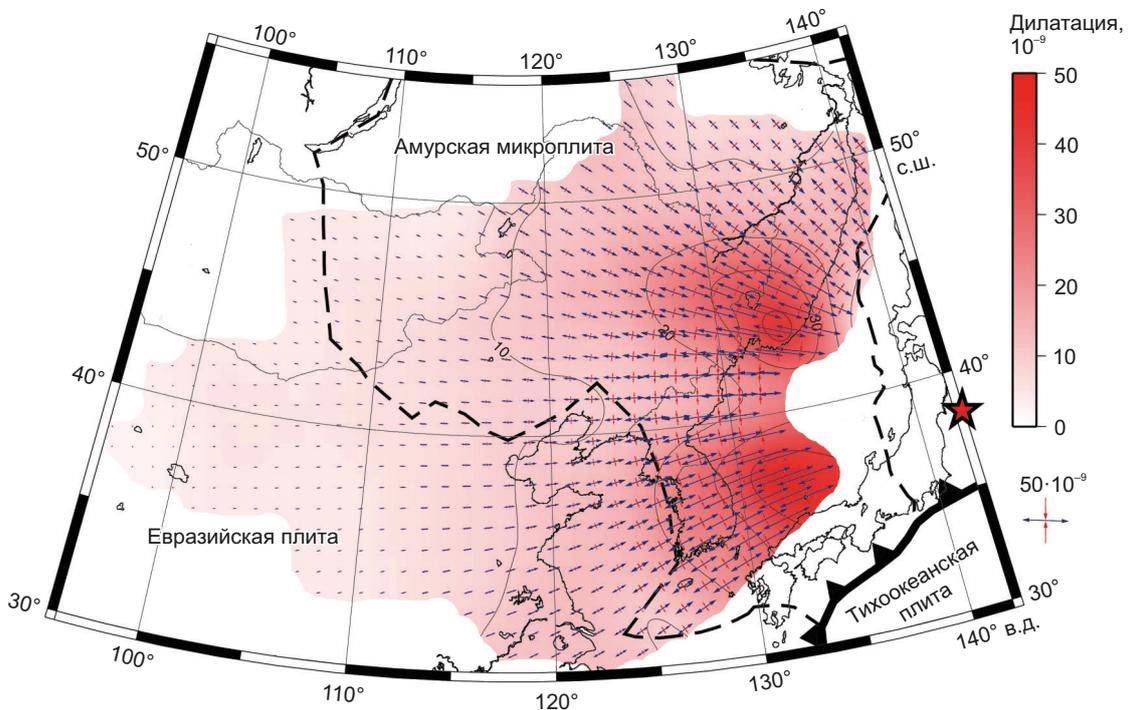


Рис. 5. Объединенное поле косейсмических деформаций в дальней относительно очага землетрясения Тохоку 2011 г. зоне. Стрелками показаны оси главных деформаций (синие – максимальное удлинение (растяжение), красные – минимальное удлинение (сжатие)). Цветом даны величины дилатации. Пунктирной линией обозначен один из вариантов положения границы предполагаемой Амурской микроплиты [Bird, 2003].

Fig. 5. Combined field of coseismic deformations in the far-field zone of the 2011 Tohoku earthquake. Axis of principal strains are given by blue (extension) and red (contraction) arrows. The dilatation rate is given by color gradient. The dotted line denotes the boundary location of the hypothesized Amurian microplate according to [Bird, 2003].

максимальные значения которого достигают $5 \cdot 10^{-8}$ – $6 \cdot 10^{-8}$, а ориентировка осей максимального удлинения практически совпадает с направлением на эпицентр землетрясения Тохоку 2011 г. Аналогичную картину интенсивного субширотного растяжения этой области демонстрирует поле значений дилатации (рис. 5), величины которой достигают значений $2.5 \cdot 10^{-8}$ – $4.5 \cdot 10^{-8}$ и более на юге Приморья, на восточном побережье Южной Кореи и к востоку от нее. Величины деформаций достаточно быстро убывают с ростом расстояния от эпицентра и на расстоянии порядка 3000 км от него уменьшаются на порядок и практически совпадают со скоростями фоновых деформаций. Согласно работе [Wang, Shen, 2020], северо-восток Китая в период до землетрясения Тохоку 2011 г. находился в обстановке сжатия, скорости которого равны первым единицам 10^{-9} год⁻¹. Более детальные оценки компонент тензора деформаций всего рассматриваемого в настоящей работе региона в межсейсмический период анализируются по данным долговременных ГНСС-наблюдений в работе [Ashurkov et al., 2016]. Там также отмечается, что восточная часть Евразийского континента находится в обстановке слабого сжатия (порядка 10^{-9} год⁻¹) с отдельными «островками» положительных, на 1.0–1.5 порядка больше фоновых, значениями дилатации, как правило, приуроченными к предполагаемым границам блоков и активных геоструктур. Следует отметить, что выделяющаяся по нашим данным в южной части Приморья зона интенсивных косейсмических деформаций растяжения практически совпадает по пространственному положению и величинам с выделенной в работе [Ashurkov et al., 2016] по ГНСС-данным межсейсмического периода положительной дилатационной аномалией ($3 \cdot 10^{-8}$ – $5 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹), что может быть обусловлено особенностями ориентации очага землетрясения Тохоку 2011 г., либо наличием в этом районе долгоживущих геоструктур, связанных, например, с погружением субдуцирующей Тихоокеанской литосферной плиты и концентрацией глубокофокусной сейсмической активности, наблюдаемой в районе стыка Южного Приморья, Китая и КНДР.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования последних двух десятилетий показали, что сильнейшие землетрясения порождают смещения и деформации земной коры, охватывающие целые регионы мира площадью до нескольких миллионов квадратных километров.

Значения косейсмических смещений, полученные на основе независимой обработки данных разнородных ГНСС-сетей, могут существенно различаться в силу ряда факторов, что способно снизить точность определения параметров моделей различных геофизических процессов, базирующихся на результатах их объединения. Для минимизации таких различий нами предложена, программно реализована и проиллюстрирована на численном примере методика приведения полей

косейсмических смещений в дальней относительно очага зоне в единую систему при помощи шестипараметрического преобразования Гельмерта аналогично комбинированию скоростей и координат геодезических сетей. Предлагаемая методика и полученное объединенное поле косейсмических смещений и деформаций северо-восточной окраины Евразийского континента могут использоваться как исходный материал для решения различных геофизических задач в рамках российских и международных проектов, объединяющих данные обширных ГНСС-сетей, и анализа происходящих в регионе геодинамических процессов.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов за конструктивные замечания, позволившие существенно улучшить содержание работы, а также ООО «Меридиан», ООО «Аэрофотопром», ООО «Гео-Плюс» за предоставление данных ГНСС-наблюдений, доктора Giordano Teza – за предоставление программного пакета GridStrain. Для построения рисунков частично использовался программный пакет GMT.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н.В. Шестаков – концептуализация, выполнение расчетов, написание работы и ее редактирование. А.К. Кишкина – написание и редактирование работы. Остальные авторы – предоставление данных ГНСС-наблюдений, редактирование и обсуждение работы.

N.V. Shestakov – conceptualization, calculations, the drafting of and editing the work. A.K. Kishkina – writing and editing the work. Other authors – providing GNSS observation data, editing and discussing the work.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

The authors declare that they have no conflicts of interest to declare. The authors read and approved the final manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Altamimi Z., Sillard P., Boucher C., 2002. ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121 (B10), ETG 2-1–ETG 2-19. <https://doi.org/10.1029/2001JB000561>.

Ashurkov S.V., Sankov V.A., Serov M.A., Luk'yanov P.Y., Grib N.N., Bordonskii G.S., Dembelov M.G., 2016. Evaluation of Present-Day Deformations in the Amurian Plate and Its Surroundings, Based on GPS Data. *Russian Geology and Geophysics* 57 (11), 1626–1634. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.008>.

Baek J., Shin Y.-H., Na S.-H., Shestakov N.V., Park P.-H., Cho S., 2012. Coseismic and Postseismic Crustal Deformations of the Korean Peninsula Caused by the 2011 Mw 9.0

- Tohoku Earthquake, Japan, from Global Positioning System Data. *Terra Nova* 24 (4), 295–300. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2012.01062.x>.
- Banerjee P., Pollitz F., Burgmann R., 2005. The Size and Duration of the Sumatra-Andaman Earthquake from Far-Field Static Offsets. *Science* 308 (5729), 1769–1772. <https://doi.org/10.1126/science.1113746>.
- Bird P., 2003. An Updated Digital Model of Plate Boundaries. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 4 (3), 1027. <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>.
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C., Plag H-P., Stein S., Okal E., 2009. GPS for Real-Time Earthquake Source Determination and Tsunami Warning Systems. *Journal of Geodesy* 83, 335–343. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0262-5>.
- Bykov V.G., Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Sorokin A.A., Kononov A.V., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Safonov D.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. и др. Единая сеть геодинимических 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>.
- Fratarcangeli F., Savastano G., D'Achille M.C., Mazzoni A., Crespi M., Riguzzi F., Devoti R., Pietrantonio G., 2018. VADASE Reliability and Accuracy of Real-Time Displacement Estimation: Application to the Central Italy 2016 Earthquakes. *Remote Sensing* 10 (8), 1201. <https://doi.org/10.3390/rs10081201>.
- Hashimoto M., Choosakul N., Hashizume M., Takemoto S., Takiguchi H., Fukuda Y., Fujimori K., 2006. Crustal Deformations Associated with the Great Sumatra-Andaman Earthquake Deduced from Continuous GPS Observation. *Earth Planets Space* 58, 127–139. <https://doi.org/10.1186/BF03353369>.
- Heki K., Miyazaki S., Takahashi H., Kasahara M., Kimata F., Miura S., Vasilenko N.F., Ivashchenko A., An K., 1999. The Amurian Plate Motion and Current Plate Kinematics in Eastern Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 104 (B12), 29147–29155. <https://doi.org/10.1029/1999JB900295>.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E., 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, GALILEO and more. Springer-Verlag, Vienna, 518 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>.
- Iinuma T., Ohzono M., Ohta Y., Miura S., 2011. Coseismic Slip Distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M 9.0) Estimated Based on GPS Data – Was the Asperity in Miyagi-Oki Ruptured? *Earth, Planets and Space* 63, 24. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.013>.
- 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>.
- Lukhnev A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Calais E., 2010. GPS Rotation and Strain Rates in the Baikal–Mongolia Region. *Russian Geology and Geophysics* 51 (7), 785–793. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.06.006>.
- Pollitz F.F., Bürgmann R., Banerjee P., 2011. Geodetic Slip Model of 2011 M9.0 Tohoku Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38 (7), L00G08. <https://doi.org/10.1029/2011GL048632>.
- Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X., 1996. Crustal Deformation across and beyond the Los Angeles Basin from Geodetic Measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 101 (B12), 27957–27980. <https://doi.org/10.1029/96JB02544>.
- 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, Mw=8.3 Okhotsk Deep Focus Earthquake. *Doklady Earth Sciences* 457, 976–981. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1408008X>.
- Shestakov N.V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A.S., Bykov V.G., Gerasimenko M.D., Luneva M.N., Gerasimov G.N. et al., 2012. Analysis of the Far-Field Crustal Displacements Caused by the 2011 Great Tohoku Earthquake Inferred from Continuous GPS Observations. *Tectonophysics* 524–525, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.12.019>.
- Takamatsu N., Muramatsu H., Abe S., Hatanaka Y., Furuya T., Kakiage Y., Ohashi K., Kato C., Ohno K., Kawamoto S., 2023. New GEONET Analysis Strategy at GSI: Daily Coordinates of over 1300 GNSS CORS in Japan throughout the Last Quarter Century. *Earth Planets Space* 75, 49. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01787-7>.
- Teza G., Pesci A., Galgaro A., 2008. Grid_Strain and Grid_Strain3: Software Packages for Strain Field Computation in 2D and 3D Environment. *Computers & Geosciences* 34 (9), 1142–1153. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.006>.
- Tregoning P., Burgette R., McClusky S.C., Lejeune S., Watson C.S., McQueen H., 2013. A Decade of Horizontal Deformation from Great Earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118 (5), 2371–2381. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50154>.
- Wang M., Li Q., Wang F., Zhang R., Wang Y., Shi H., Zhang P., Shen Z., 2011. Far-Field Coseismic Displacements Associated with the 2011 Tohoku-Oki Earthquake in Japan Observed by Global Positioning System. *Chinese Science Bulletin* 56, 2419–2424. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4588-7>.
- Wang M., Shen Z.K., 2020. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived from GPS and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125 (2), e2019JB018774. <https://doi.org/10.1029/2019JB018774>.
- Zonenshain L.P., Savostin L.A., 1981. Geodynamics of the Baikal Rift Zone and Plate Tectonics of Asia. *Tectonophysics* 76 (1–2), 1–45. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90251-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Объединенное поле трансформированных косейсмических смещений по направлениям «Север – Юг» (dN) и «Восток – Запад» (dE)**Table 1.1.** The combined field of the transformed coseismic displacements in the directions "North – South" (dN) and "East – West" (dE)

Наименование пункта	Положение пункта		Косейсмические смещения	
	Широта	Долгота	dE , мм	dN , мм
BHAO	128.980°	36.160°	27.9±2.1	3.4±1.9
JEJU	126.460°	33.290°	11.6±2.2	2.1±1.9
MKPO	126.380°	34.820°	15.5±1.9	2.0±1.7
MLYN	128.740°	35.490°	24.0±2.1	3.1±1.8
SKCH	128.560°	38.250°	33.8±2.0	-0.6±2.3
SKMA	126.920°	37.490°	24.0±1.7	0.8±1.6
KOHG	127.520°	34.450°	15.7±1.9	2.7±2.0
ANHN	126.140°	36.670°	16.9±1.9	1.6±2.0
CCHN	127.720°	37.990°	28.4±2.2	0.8±1.8
DANG	126.600°	34.100°	13.1±2.1	2.5±2.3
DOKD	131.870°	37.240°	54.6±2.1	3.0±1.9
EOCH	125.970°	36.130°	18.1±1.8	1.9±2.0
GASA	126.040°	34.460°	12.8±1.7	1.9±2.0
GEOM	127.320°	34.010°	15.5±2.1	2.2±1.9
HGDO	125.200°	34.710°	12.5±1.9	1.1±2.2
HOMI	129.570°	36.080°	29.3±2.1	3.6±2.0
JEOJ	128.400°	38.550°	31.0±2.1	-1.7±2.1
JUKB	129.430°	37.060°	32.6±2.0	1.8±2.2
JUMN	128.830°	37.900°	33.4±1.9	-0.2±2.0
MARA	126.270°	33.120°	10.3±2.0	2.0±1.9
MLDO	126.320°	35.860°	17.8±1.8	1.4±1.9
MOOJ	127.580°	35.900°	21.2±1.9	2.5±1.9
PYCH	128.490°	37.350°	30.7±2.1	0.5±2.3
SEOI	128.740°	34.790°	19.1±2.1	4.0±2.1
SOCH	124.730°	37.760°	16.9±1.8	0.8±1.6
SOHE	125.100°	34.090°	11.6±2.0	2.0±2.1
SORI	127.800°	34.410°	15.4±2.0	2.8±2.3
SUWN	127.054°	37.276°	23.8±1.9	1.3±1.7
ULLE	130.800°	37.520°	47.4±2.2	1.2±2.3
YNDO	129.070°	35.060°	22.7±1.8	5.5±1.9
BOEN	127.730°	36.490°	24.3±1.8	2.4±1.7
CHCN	127.710°	37.870°	25.7±2.5	0.8±4.0
CHEN	127.160°	36.880°	20.9±2.1	0.4±2.0
CHJU	126.530°	33.510°	11.9±2.1	4.0±2.0
CHLW	127.420°	38.160	25.7±2.0	-0.2±1.6
CHNG	128.480°	35.530°	23.1±1.8	4.1±1.6
CHSG	129.060°	36.440°	28.3±1.9	3.6±2.0
CHWN	128.690°	35.240°	20.5±2.1	5.0±2.1
CHYG	126.800°	36.460°	20.5±2.0	2.4±1.7
CNJU	127.460°	36.630°	22.8±1.9	2.6±1.7
DOND	127.060°	37.900°	24.7±1.8	0.7±1.6
GOCH	127.940°	35.670	22.9±2.1	3.7±2.1
GSAN	127.790°	36.820°	26.0±2.0	1.6±1.7
HADG	127.710°	35.160°	18.7±2.1	3.3±2.4
HONC	128.190°	37.710°	29.4±1.8	1.6±1.9
INCH	126.690°	37.420°	21.7±2.0	1.2±1.8
INJE	128.170°	38.070°	31.2±3.3	-1.4±2.5
JAHG	126.900°	34.680°	16.4±2.1	4.8±1.9
JINJ	128.050°	35.170°	19.8±1.9	3.4±1.7
JUNG	126.970°	35.620°	18.9±1.7	3.3±1.9
JUNJ	127.140°	35.840°	19.4±1.9	2.7±1.7
KANR	128.870°	37.770°	33.8±2.0	0.5±2.0

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

Наименование пункта	Положение пункта		Косейсмические смещения	
	Широта	Долгота	dE , мм	dN , мм
KUNW	128.570°	36.230°	28.3±2.0	3.0±2.3
KWNJ	126.910°	35.180°	19.8±2.0	1.9±2.0
MUJU	127.660°	36.000°	21.6±1.8	3.3±1.7
NAMW	127.400°	35.420°	19.4±1.8	3.3±1.8
NONS	127.100°	36.190°	20.8±1.9	3.1±1.6
PAJU	126.740°	37.750°	22.7±1.7	0.5±1.6
SEOS	126.490°	36.780	20.1±1.6	1.8±1.5
SNJU	128.140°	36.380°	24.0±1.9	2.7±1.9
SONC	127.490°	34.960°	17.6±1.9	3.6±1.9
SOUL	127.080°	37.630°	23.9±1.7	0.3±1.7
TABK	128.980°	37.160°	31.6±2.2	1.8±3.2
TEGN	128.800°	35.910°	25.3±2.0	3.5±2.0
WNJU	127.950°	37.340°	26.6±1.7	1.8±1.6
WOLS	129.420°	35.500°	26.3±2.0	5.0±2.0
WULJ	129.410°	36.990°	33.1±1.8	2.2±1.9
YANP	127.510°	37.450°	27.6±1.8	0.7±1.7
YECH	128.450°	36.650°	25.8±1.9	2.7±1.8
YONK	126.520°	35.280°	15.6±1.9	1.2±2.0
YOWL	128.460°	37.180°	29.1±1.8	0.5±1.7
ARTM	132.196°	43.360°	39.3±2.8	-20.6±2.6
CHMN	133.041°	51.137°	6.7±2.0	-6.0±2.0
GRNC	132.166°	43.698°	36.1±2.3	-19.0±1.7
KULD	131.738°	49.236°	10.2±2.1	-7.4±1.9
BLAG	127.521°	50.257°	8.6±1.7	-5.3±1.6
VANB	140.255°	49.091°	4.4±2.4	-5.1±1.8
VLAD	131.926°	43.197°	40.2±2.8	-19.2±2.2
ZEYA	127.286°	53.757°	5.4±2.0	-2.4±2.0
SHUL	131.157°	42.581°	40.8±2.7	-15.9±2.4
LESZ	133.385°	45.469°	25.6±3.0	-18.8±3.6
PART	133.126°	43.123°	46.8±2.9	-26.0±2.2
NKHD	132.891°	42.828°	47.5±3.3	-26.1±2.3
MONR	141.259°	46.246°	11.9±3.9	-13.1±3.3
TERN	136.601°	45.062°	24.9±7.6	-33.6±6.9
AHBB	117.296°	32.905°	5.0±1.9	2.0±1.8
BJGB	117.158°	40.692°	9.0±1.8	0.0±1.8
BJSH	116.224°	40.251°	8.0±1.9	0.0±1.8
BJYQ	115.968°	40.370°	8.0±1.8	0.0±1.7
DLHA	97.378°	37.381°	1.0±1.8	0.0±1.7
DXIN	100.201°	40.984°	1.0±1.8	1.0±1.8
GUAN	113.340°	23.185°	2.0±3.1	-1.0±2.5
HAHB	114.519°	35.658°	5.0±1.9	1.0±1.8
HAJY	112.447°	35.163°	4.0±2.1	1.0±1.9
HECC	115.840°	40.884°	8.0±2.0	0.0±2.0
HECD	117.918°	41.016°	10.0±2.1	0.0±2.0
HECX	116.931°	38.465°	8.0±2.0	0.0±1.9
HELQ	114.309°	38.247°	6.0±2.0	1.0±2.0
HELY	114.707°	37.399°	6.0±2.1	1.0±2.0
HETS	118.295°	39.736°	10.0±2.1	0.0±2.0
HEYI	114.156°	40.127°	7.0±1.9	0.0±1.8
HEZJ	114.900°	40.828°	7.0±2.1	0.0±2.0
HLAR	119.741°	49.270°	6.0±2.2	-1.0±2.2
HLFY	134.277°	48.367°	11.0±2.2	-10.0±2.4
HLHG	130.236°	47.353°	15.0±2.0	-8.0±2.2
HLWD	126.136°	48.671°	10.0±2.0	-5.0±2.1
HRBN	126.620°	45.703°	15.0±1.6	-7.0±1.6
JIXN	117.530°	40.076°	9.0±1.6	-1.0±1.5

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

Наименование пункта	Положение пункта		Косейсмические смещения	
	Широта	Долгота	dE , мм	dN , мм
JLCB	128.106°	42.411°	29.0±1.9	-9.0±1.9
JLYJ	129.505°	42.875°	33.0±1.9	-12.0±2.0
JSL5	119.419°	31.349°	6.0±2.0	1.0±1.9
JSLY	119.467°	34.722°	9.0±2.0	3.0±1.9
JSNT	120.890°	31.953°	6.0±2.2	1.0±2.1
JSYC	120.019°	33.376°	8.0±2.2	1.0±2.0
LNDD	124.327°	40.032°	19.0±2.1	-2.0±2.1
LNJZ	121.740°	39.092°	13.0±1.9	0.0±1.8
LNSY	123.579°	41.827°	17.0±2.4	-3.0±2.4
LNK	122.603°	40.684°	15.0±1.9	-3.0±1.9
LUZH	105.414°	28.872°	1.0±2.2	0.0±2.0
NMAG	122.627°	43.303°	14.0±1.7	-3.0±1.7
NMAL	120.113°	43.863°	11.0±2.0	-2.0±2.0
NMDW	116.963°	45.513°	8.0±1.9	-1.0±1.9
NMER	123.727°	50.576°	6.0±2.1	-3.0±2.2
NMTK	111.252°	40.261°	5.0±1.8	1.0±1.7
NMWL	122.027°	46.041°	11.0±2.7	-1.0±2.7
NMZL	115.980°	42.233°	8.0±2.0	-1.0±2.0
SDCY	119.460°	36.754°	10.0±1.9	1.0±1.8
SDJX	116.351°	35.427°	7.0±1.8	1.0±1.7
SDLY	118.288°	35.000°	8.0±2.2	1.0±2.1
SDQD	120.304°	36.077°	11.0±1.8	0.0±1.7
SDRC	122.421°	37.170°	14.0±2.0	1.0±1.9
SDYT	121.436°	37.483°	13.0±1.9	1.0±1.8
SDZB	117.992°	36.806°	9.0±2.0	1.0±1.9
SUIY	130.908°	44.433°	28.0±2.0	-15.0±2.1
SXCZ	113.180°	36.225°	5.0±2.1	1.0±2.0
SXDT	113.392°	40.122°	6.0±1.9	0.0±1.8
SXGX	111.900°	36.252°	4.0±2.3	1.0±2.2
SXLF	111.371°	36.084°	4.0±2.0	1.0±1.9
SXLQ	114.021°	39.382°	6.0±2.0	1.0±1.9
SXTY	112.433°	37.712°	5.0±2.0	1.0±1.9
TAIN	117.123°	36.214°	9.0±2.0	1.0±1.9
TJBD	117.399°	39.697°	9.0±1.9	0.0±1.9
TJBH	117.689°	39.084°	9.0±2.1	0.0±2.0
XIAA	108.986°	34.178°	3.0±1.6	0.0±1.5
XIAM	118.083°	24.450°	1.0±2.3	-1.0±1.9
XNIN	101.774°	36.601	1.0±1.7	0.0±1.6
YANC	107.437°	37.779°	3.0±2.0	0.0±1.9
ZHNZ	113.105°	34.521°	4.0±1.8	1.0±1.7
ZJJD	119.274°	29.475°	4.0±2.0	0.0±1.8
ZJWZ	120.763°	27.934°	4.0±1.9	0.0±1.7
ZJZS	121.989°	30.071°	5.0±1.9	1.0±1.8
TWTF	121.165°	24.954°	3.0±2.1	-2.0±1.7
ULAB	107.052°	47.865°	3.0±1.5	0.0±1.5
CHAN	125.444°	43.791°	18.0±1.8	-6.0±1.8
SHAO	121.200°	31.100°	6.0±1.7	1.0±1.5
DAEJ	127.374°	36.399°	23.0±1.9	2.0±1.8
MCIL	153.979°	24.290°	-6.0±2.3	6.0±2.1
BJFS	115.892°	39.609°	6.0±2.1	0.0±2.1
KHAJ	135.046°	48.521°	11.0±2.0	-11.0±2.1
SUWN	127.054°	37.276°	24.0±2.0	1.0±1.9