

*В. Ю. Тимофеев<sup>1\*</sup>, П. Ю. Горнов<sup>2</sup>, А. В. Тимофеев<sup>1</sup>*

## **Исследование полей смещений на континентальной окраине Дальнего Востока России**

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск  
Российская Федерация

\*e-mail:timofeevvy@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты GPS наблюдений, выполненных в Приморье за период с 2003 г. по 2020 гг. Здесь, на восточном краю Азии сходятся пять тектонических плит Земли. Проанализированы результаты измерений на широтном профиле, пересекающем Центральной Сихотэ-Алиньский разлом. Рассматривались косейсмические и постсейсмические смещения в дальней зоне нескольких землетрясений магнитудой более 8.0. В рамках упругой модели косейсмические смещения хорошо соответствуют дислокационной модели землетрясения. Исследованы эффекты Японского землетрясения Тохоку-Оки магнитудой 9.0, случившегося 11 марта 2011 года. В рамках двухслойной модели с реологией по Максвеллу определена вязкость астеносферы. Для межплитной границы, в зоне контакта континент–океан в рамках модели изгиба сделана оценка мощности (20–25 км) упругой верхней части земной коры.

**Ключевые слова:** GPS наблюдения в Приморье, землетрясение, модель изгиба, мощность упругой части земной коры, вязкость нижней части.

*V. Y. Timofeev<sup>1\*</sup>, P. Y. Gornov<sup>2</sup>, A. V. Timofeev<sup>1</sup>*

## **Study of displacement fields at continental coast of Russian Far East**

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup> Kosigin Institute of Tectonics and Geophysics Far Eastern Branch of RAS, Khabarovsk,  
Russian Federation

\*e-mail:timofeevvy@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** The paper presents the results of GPS observations performed in Primorye (2003-2020), where the union of five tectonic plates is presented. This article analyzes the outcomes of measurements on the Central Sikhote-Alin fault. Coseismic and postseismic displacements in the far zone of several earthquakes with a magnitude of more than 8 were considered. In frame of elastic model coseismic jump correlated with dislocation earthquake model. The effects of the Japanese Tohoku-Oki earthquake with a magnitude  $M = 9$ , which occurred on March 11, 2011, were studied. The viscosity of the asthenosphere is estimated. In frame of the two-layer Maxwell rheological model. Using the bending model of continent–ocean contact zone, we estimated the thickness of the elastic upper part of the Earth’s crust in the at 20–25 km.

**Keywords:** GPS observations in Primorye, earthquake, bending model, thickness of the elastic upper part of Earth’s crust, viscosity of lower part

## Введение

Предметом нашего исследования является современное состояние восточной окраины Азии. Здесь регистрируется сложная современная кинематическая картина смещений в области сочленения пяти известных тектонических плит (Рис. 1).

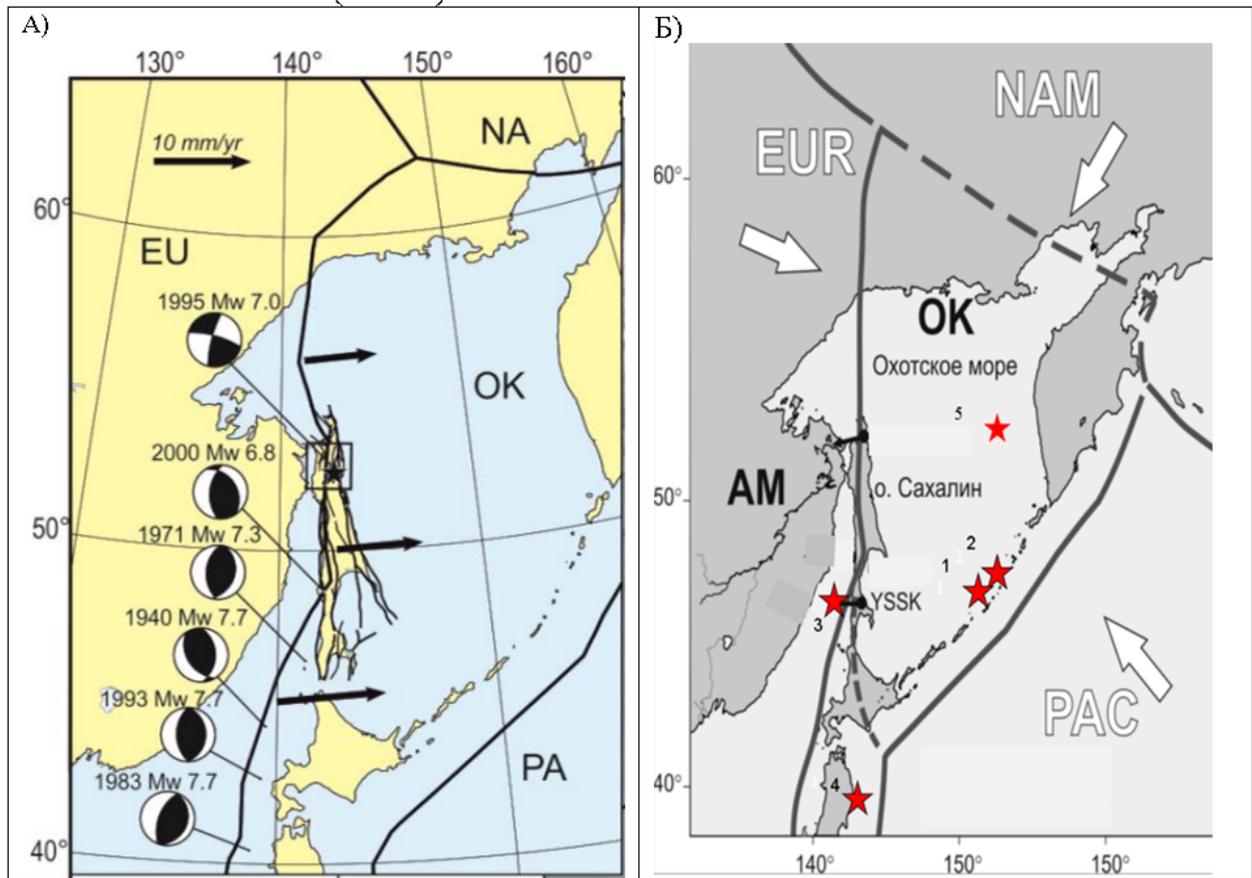


Рис.1А. Механизмы очагов сильных землетрясений (до 2003 года) вдоль границы Охотской (ОК) и Евразийской плиты (EU) (черная жирная линия) представлены в работе [1]. РА – Тихоокеанская плита; NA – Североамериканская плита. Стрелками показаны вектора смещения по модели MARVEL [2] Евразийской плиты относительно Североамериканской плиты.

Рис. 1Б. Схема взаимодействия тектонических плит в восточной части Азии. Стрелками показано направление смещений плит. Сплошные линии – границы плит. Здесь: NAM – Североамериканская, EUR – Евразийская, PAC – Тихоокеанская, ОК – Охотская, АМ – Амурская литосферные плиты. Цифрами обозначены современные землетрясения с гипоцентрами в земной коре, происшедшие в последние десятилетия, начиная с 2003 года: 1 и 2 - Симуширские землетрясения 15.11.2006 и 13.01.2007 с магнитудами  $M = 8.0$  и  $M = 8.1$ ; 3 - Невельское землетрясение 02.08.2007 г. с  $M = 6.5$ ; 4 - катастрофическое Японское землетрясение 11.03.2008 с  $M = 9.0$ . Цифра 5 - Охотоморское землетрясение 24.05.2013 года магнитудой 8.3. с глубиной очага - 600 километров

Исследуемая нами область охватывает окраину континента от 52 градуса до 42 градуса северной широты и от 131 градуса до 135 градуса восточной долготы. Известно, что на этой территории в настоящее время доминирует режим сжатия с развитием субмеридианальных орогенных структур (например, хребет Сихотэ-Алинь). Напряжения, накопленные в земной коре, концентрируются и активно разгружаются в градиентных зонах на границах жестких плит. Для определения скорости современных движений земной коры нами применялись сетевые измерения по отдельным профилям, а также ежегодные продолжительные измерения на полигонах. Информация о временных изменениях, связанных с постсейсмической релаксацией при сильных землетрясениях региона, позволяет рассмотреть реологические свойства астеносферы в этом регионе. Используя модели изгиба края континентальной плиты в зоне контакта с океаном, можно определить мощность упругой верхней коры. Задачами наших исследований являлись анализ современных полей смещения, полученных GPS методом, исследование связи скоростей современных смещений с сейсмичностью и структурой земной коры.

### ***Методы исследования и результаты***

Рассматривая возможности метода космической геодезии, отметим, что основная проблема при вычислении расстояния до спутника системы спутниковой навигации связана с синхронизацией часов на спутнике и в приёмнике. Разрешение неоднозначностей и устранение искажений позволяют достигать точности измерения 1-2 мм, что обусловило возможность применения системы GPS для геодинамических исследований. Сетевые измерения на Дальнем Востоке в 2003 году начаты с закладки базового пункта Змейка (ZMEY) и широтного профиля из 5 пунктов, пересекающего Сихотэ-Алинь. При измерениях применялись двухчастотные приемники космической геодезии типа Trimble 4700 с антеннами типа TRM33429.00+GP. Для исключения сезонных искажений в результатах, наблюдения проводились ежегодно в сентябре. При анализе материалов использовались специальные программные пакеты, наиболее распространенные в работе международных научных центров - GAMIT-GLOBK [3]. Данные по Сихотэ-Алиньскому профилю были дополнены и обработаны с использованием программного комплекса BERNESE-5.0 [4, 5]. Среднеквадратичная ошибка определения составляет 0.5-1.3 мм. Отражение косейсмических смещений при землетрясениях, показанных на Рис. 1Б, приведено на Рис. 2Б. Согласно результатам измерений, в Приморье в дальней зоне Японского землетрясения 2011 года (расстояние 1000-1500 км от эпицентра, его координаты 38.1°N, 142.9°E), быстрый косейсмический эффект, характерный для горизонтальных смещений (Таблица 1), описывается в рамках теории упругости и составляет от 40 мм на юге Приморья до 10 мм на юге Хабаровского края [6]. Постсейсмические горизонтальные смещения продолжительны во времени и достигают за период 2011-2020гг. 30 мм - 60 мм, ориентированы так же, как и косейсмические на эпицентр землетрясения (на ЮЮВ). Вертикальные постсейсмические смещения пункта показаны на Рис. 3А.

Значения косейсмических смещений для пунктов Дальнего Востока России, полученных методом GPS по нашим данным и по данным (\*) [6]

Код пункта	Широта $\varphi^\circ$	Долгота $\lambda^\circ$	$V_n$ в мм с ошибкой	$V_e$ в мм с ошибкой	Модуль вектора в мм
BRIA	52.09	135.92	-9±2	+4±2	9.8 ± 2.0
DUKI	51.57	135.87	-7±2	+2±2	7.3 ± 2.1
CHMN*	51.13	133.04	-6.6±0.8	+2.1±0.9	6.9 ± 1.1
HURM	51.03	136.91	-8±2	-2±2	8.2 ± 2.0
UKTR	50.36	138.26	-8±3	+4±3	9.0± 3.0
KULD*	49.23	131.73	-8.0±1.1	+4.0±1.5	8.9 ± 1.6
VANB*	49.09	140.25	-4.7±1.2	-0.7±1.7	4.8 ± 1.9
KHAJ*	48.52	135.16	-10.8±1.0	+5.4±1.0	12.0 ± 1.2
GEO0*	48.47	135.05	-10.9±0.8	+5.1±0.8	12.1 ± 1.1
ZMEY	48.10	135.59	-11.0±0.8	+4.0±0.8	11.7 ± 1.0
GRNC*	43.69	132.16	-20.4±1.0	+31.5±0.9	40.0 ± 1.3
ARTM*	43.35	132.19	-22.1±1.3	+34.9±0.9	41.3 ± 1.4
VLAD*	43.19	131.92	-21.1±0.9	+36.3±0.9	41.9 ± 1.0
DVGU*	43.12	131.88	-18.8±1.1	+35.3±1.2	37.5 ± 1.0
GORA	42.58	131.15	-21±2	+38± 2	43.0 ± 2.0

Известно, что для описания профиля изгиба, вызванного деформацией земной поверхности на окраине континента, используется следующее соотношение [7]:

$$\omega/\omega_b = 2^{1/2} \cdot e^{-\pi/4} \cdot \exp[-(\pi/4) \cdot (x - x_0)/(x_b - x_0)] \cdot \sin[\pi/4 \cdot (x - x_0)/(x_b - x_0)] \quad (1)$$

где  $x_b - x_0 = \pi \cdot \Delta/4$ ,  $x_0$  – точка на берегу,  $x_b$  – самая верхняя точка профиля,  $\Delta$  – параметр кривизны профиля

Далее через параметр кривизны профиля, плотность мантии, плотность воды, определяем связь изгибной жесткости  $D$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , модуля Юнга слоя  $E$  и его мощности  $h$  [7]:

$$D = E \cdot h^3 / [12(1 - \nu^2)] \quad (2)$$

И получаем выражение для мощности упругого слоя:

$$h = \{D \cdot [12(1 - \nu^2)/E]\}^{1/3}, \quad (3)$$

Проанализировав рельеф и батиметрию в области контакта континент-океан, можно оценить мощность упругой части коры.

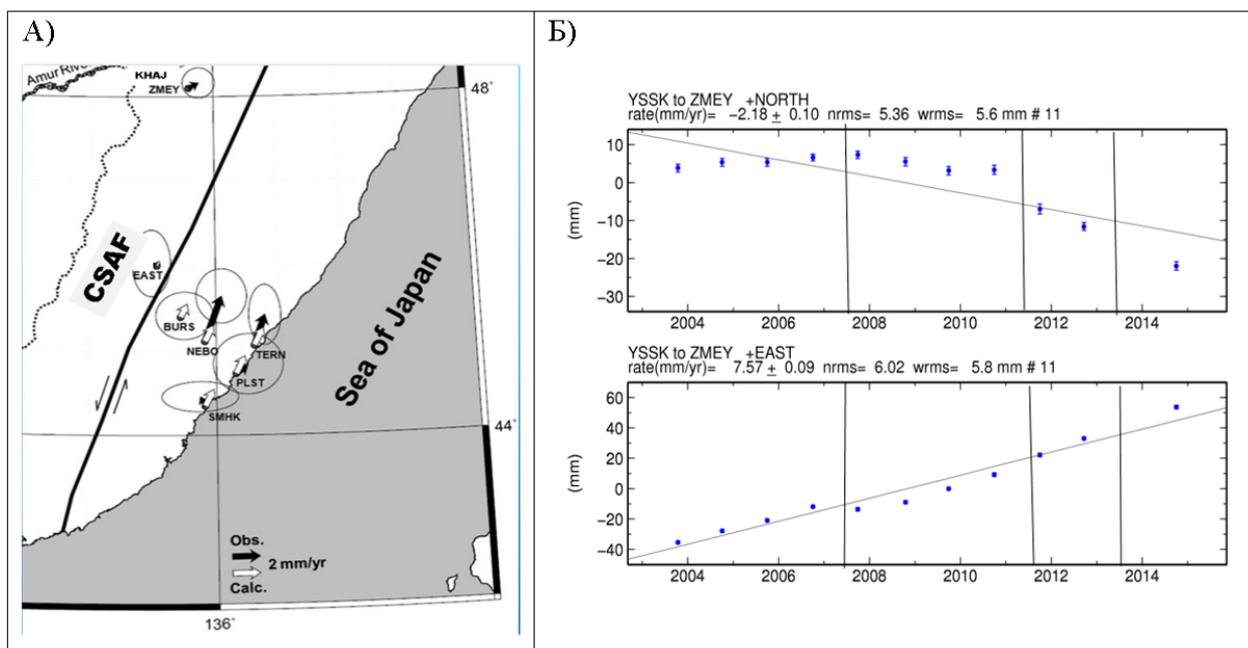


Рис. 2А. Скорости горизонтальных смещений пунктов профиля через Центральный Сихотэ-Алинский разлом (CSAF) в период 2003-2006 гг. отсутствия сильных землетрясений в регионе. Показаны экспериментальные (черные стрелки) и модельные значения (белые стрелки) левостороннего движения по разлому

Рис. 2Б. Изменение положения пункта Змейка (ZMEY, 2003-2014 гг.) относительно пункта Южно-Сахалинск (YSSK, 47.03°N и 142.72°E). Смещение на Юг и на В в мм. Вертикальные линии - периоды землетрясений (Рис. 1Б). Скорость сближения тектонических плит (Амурской и Охотской) 8 мм/год

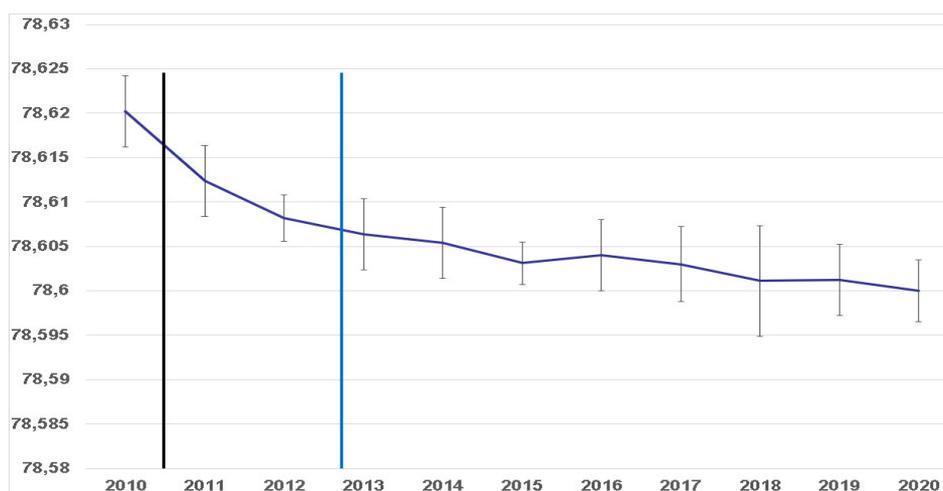


Рис. 3. Изменение высоты пункта GORA (юг Приморья) в метрах с ошибкой за период 2010–2020 гг., полученное по данным ежегодных измерений в сентябре. Вертикальные линии - моменты землетрясений 11.03.2011 г. и 24.05.2013 г.

### Обсуждение результатов

Полученные в результате измерений данные о постсейсмических смещениях в Приморье (Рис. 3) описываются кривой релаксации типа  $w = A \cdot \exp(-t/T)$  с различным временем затухания  $T$  и коэффициентом  $A$ , связанным со значением косейсмического скачка. Для двухслойной модели: верхний упругий и нижний вязко-упругий слой, при реологии по Максвеллу, затухание определяется временем  $T$ . Оно связано с упругими и вязкими параметрами нижнего слоя:

$$T = \eta/2\mu \quad (4)$$

где:  $\mu$  – модуль сдвига,  $\eta$  - вязкость нижнего слоя.

Для вязкости нижнего слоя получаем из (4):

$$\eta = 2 \cdot T \cdot \mu \quad (5)$$

Из соотношения (5), при значении упругого модуля слоя  $\mu = 30 \div 55$  ГПа и значениях  $T$  от 8 лет для горизонтальных смещений до 3 лет для вертикальных получаем величину вязкости нижнего слоя:  $0.6 \cdot 10^{19} - 2.8 \cdot 10^{19}$  Па·с. Известно, что для пунктов, находящихся в северо-восточном Китае, из пространственного решения [8, 9] для распределения постсейсмических скоростей, определены значения вязкости нижнего слоя. Они находятся в диапазоне от  $0.8 \cdot 10^{19}$  Па·с до  $2 \cdot 10^{19}$  Па·с. В рамках модели вязкой релаксации смещений получены оценки мощности верхней упругой части земной коры от 20 км до 30 км.

Рассмотрим изгиб поверхности, вызванный взаимодействием тектонических плит (Рис. 4). Для интерпретации используем соотношения (1, 2, 3), при  $(x_b - x_0) = 40 \div 50$  км. При плотности мантии  $\rho_m = 3400$  кг/м<sup>3</sup>, плотности воды  $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, параметре кривизны профиля  $\Delta = 51 \div 64$  км и ускорении силы тяжести  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>, по соотношению (2) определяем величину изгибной жесткости  $D = (0.4-1.0) \cdot 10^{23}$  Н·м. Из соотношения (3) при значении коэффициента Пуассона  $\nu = 0.25$ , модуля Юнга  $E = 75$  ГПа, для юга Приморья получаем оценку мощности упругой верхней коры 20 - 25 км. Полученные оценки соответствуют результатам определений в рамках двухслойной вязко-упругой модели для постсейсмической релаксации.

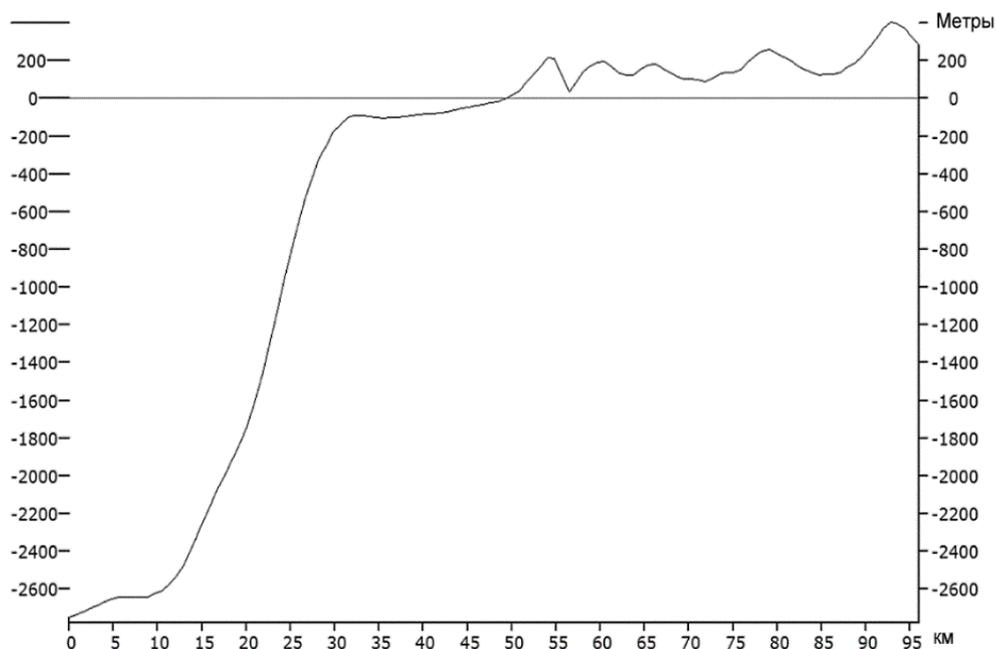


Рис. 4. Изгиб земной поверхности по профилю в направлении с ЮЮВ на ССЗ (дно Японского моря – побережье) [10]. Вертикальная шкала в метрах, горизонтальная в километрах.

### *Заключение*

Около двух десятилетий в Приморье проводились регулярные наблюдения методами космической геодезии. Для Центрального Сихотэ-Алиньского разлома данные измерений свидетельствуют о левостороннем смещении по разлому, что соответствует геологическим представлениям. В регистрируемых на пунктах сети многолетних смещениях выделяются косейсмические эффекты, связанные с сильными (магнитудой более 8.0) землетрясениями региона. Величина косейсмических смещений, наблюдаемых в дальней зоне (более 1000 км от эпицентра) Японского землетрясения (11.03.2011,  $M = 9.0$ ), достигала 40 мм, что соответствует расчётам для дислокационной модели землетрясения в упругом полупространстве. Далее, в течение десяти лет с 2011 по 2020 год в Приморье регистрируются постсейсмические смещения. Интерпретация данных по затуханию смещений проводилась с использованием двухслойной вязко-упругой модели с временами релаксации от 3 лет до 8 лет. В рамках модели Максвелла вязкость астеносферы оценивается в  $0.6 \cdot 10^{19} - 2.8 \cdot 10^{19}$  Па·с. По упругой модели, используя данные об изгибе земной поверхности по профилю континент-океан, получена оценка мощности упругой части коры: 20-25 км. Полученные оценки мощности и вязкости коррелируют с определениями для северо-восточного Китая и могут применяться при моделировании сейсмических процессов и их последствий. Экспериментально полученные значения скоростей смещений пунктов Приморья могут быть использованы для прогноза техногенных движений на электролиниях, на железнодорожных путях, на нефти и газопроводах, мостах и туннелях региона.

## *Благодарности*

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН номер FWZZ-2022-0019, проекта НИР ИТиГ ДВО РАН.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Katsumata K., Kasahara M., Ichiyanagi M., Kikuchi M., Sen R., Kim C.U., Ivaschenko A., Tatevossian R. The 27 May 1995 Ms 7.6 Northern Sakhalin Earthquake: An Earthquake on an Uncertain Plate Boundary // Bulletin of the Seismological Society of America -2004. - 94 (1). - P. 117–130. <http://dx.doi.org/10.1785/0120020175>.
1. De Mets C., Gordon R. G., Argus D. F. Geologically recent plate motions // Geophysical Journal International. –2010. – Vol. 181. – P. 1–80.
2. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GAMIT Reference Manual, GPS analysis in MIT, GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.3. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, USA. - 2006.
3. Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. Bernese GPS Software Version 5.0. AIUB. University of Bern. – 2007. – 612 p.
4. Shestakov, N.V., Gerasimenko, M.D., Takahashi, H., Kasahara, M., Bormotov, V.A., Bykov, V.G., Kolomiets, A.G., Gerasimov, G.N., Vasilenko, N.F., Prytkov, A.S., Timofeev, V.Yu., Ardyukov, D.G., Kato, T. Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations. // Geophysical Journal International. – 2011. - 184(2). - P. 529–540. - doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04871.x.
5. Shestakov N.V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A.S., Bykov V.G., Gerasimenko M.D., Serov M.A. Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations // Tectonophysics. – 2012. - Vol. 524-525. - P. 76-86. - doi:10.1016 /j.tecto.2011.12.019
6. Turcotte D.L., Schubert D. Geodynamics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press. -2001. - 528 p.
7. Pollitz F.F. VISCO-1D. Version 3. Tutorial [Электронный ресурс] // Reston: USGS. - 2006. - 36 p.
8. Zhao Qian, Fu Guangyu, Wu Weiwei. Spatial-temporal evolution and corresponding mechanism of the far-field post-seismic displacements following the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake // – 2019. - Congress IUGG. - G06p-311.
9. ESA Basic dataset for VTGoce, <http://eo-virtual-archive1.esa.int /GOCEGravityModels.html>

© В. Ю. Тимофеев, П. Ю. Горнов, А. В. Тимофеев, 2023