

**COSEISMIC EFFECTS OF THE 11 JANUARY 2021 HOVSGOL, MONGOLIA, EARTHQUAKE****A.V. Lukhnev**  , **O.F. Lukhneva** , **V.A. Sankov** , **A.I. Miroshnichenko** 

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

**ABSTRACT.** The research provides an example of the GPS time series processing for monitoring of horizontal coseismic displacements during the 11 January 2021 M 6.7 Hovsgol earthquake, Mongolia. There has been developed a methodological approach to the study of coseismic displacements at the time of the earthquake. This paper presents the results of determining the values of horizontal coseismic displacements which are 0.6 mm in the junction zone between the Hovsgol and Tunka depressions and hundredths of a millimeter for the Siberian block and Transbaikalia areas. For stations located on the southern margin of the Siberian block and stations in Transbaikalia, the vectors of coseismic displacements are directed to the west. The calculated displacement vectors of the stations near the epicenter (MNDY and BADG) are directed to the southeast.

**KEYWORDS:** GPS; tectonic deformations; earthquake; amplitude; coseismic displacements

**FUNDING:** The work was done partly on the equipment of "Geodynamics and Geochronology" Shared Research Facilities of the Institute of the Earth's Crust SB RAS (grant 075-15-2021-682) and partly on the equipment of "Angara" Shared Research Facilities of the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS.

**SHORT COMMUNICATION**

Received: December 8, 2021

Revised: January 27, 2022

Accepted: February 16, 2022

**Correspondence:** Andrey V. Lukhnev, [loukhnev@crust.irk.ru](mailto:loukhnev@crust.irk.ru)

**FOR CITATION:** Lukhnev A.V., Lukhneva O.F., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., 2022. Coseismic Effects of the 11 January 2021 Hovsgol, Mongolia, Earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0626. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0626

## КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ХУБСУГУЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В МОНГОЛИИ 11 ЯНВАРЯ 2021 г.

А.В. Лухнев, О.Ф. Лухнева, В.А. Саньков, А.И. Мирошниченко

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Приведен пример обработки временных рядов GPS-наблюдений для оперативного исследования горизонтальных косейсмических смещений при Хубсугульском землетрясении в Монголии 11 января 2021 г. ( $M=6.7$ ). Разработан методический подход для изучения косейсмических смещений в момент землетрясения. В работе представлены результаты определения значений горизонтальных косейсмических смещений, которые в зоне сочленения Хубсугульской и Тункинской впадин составляют 0.6 мм, а для районов Сибирского блока и Забайкалья – сотые доли миллиметра. Для станций, расположенных на южной окраине Сибирского блока, и станций Забайкалья, косейсмические смещения направлены на запад. Рассчитанные векторы смещений близлежащих к эпицентру станций (MNDY и BADG) направлены на юго-восток.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** GPS; тектонические деформации; землетрясение; амплитуда; косейсмические смещения

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** В работе частично задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (грант № 075-15-2021-682) и ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Высокоточная технология GPS используется для изучения природных процессов Земли, таких как сейсмичность [Larson et al., 2003; Bock et al., 2011; Takahashi, 2011; и др.], вулканическая деятельность [Cervelli et al., 2006; и др.] и оползни [Gili et al., 2000; и др.], явлений в тропосфере и ионосфере [Afraimovich et al., 1998; Lukhneva et al., 2016; Dembelov et al., 2015, 2017, 2018]. Одной из главных задач GPS-геодезии является определение скоростей и направлений современных тектонических деформаций [DeMets et al., 2007; Lukhnev et al., 2010, 2013, 2021; Sankov et al., 2011, 2014; Miroshnichenko et al., 2018], а также расчет косейсмических [Johnson, Segall, 2004; Métivier et al., 2014] и постсейсмических смещений [Dong et al., 1998; Hudnut et al., 2002].

Для района Тункинской впадины, являющейся юго-западной частью Байкальской рифтовой системы (БРС), были описаны деформации в кайнозойских осадках, характеризующие сдвиговые и взбросо-сдвиговые режимы поля напряжений [Sankov et al., 1997, 2004; Parfeevets et al., 2002]. По фокальным механизмам землетрясений на юго-западном фланге БРС определены сеймотектонические деформации транспрессионных и сдвиговых режимов [Dzhurik, Dudarmaa, 2004].

Ранние оценки скоростей современных тектонических деформаций были получены для Байкальского региона в целом [Calais et al., 1998, 2003, 2010; Lukhnev et al., 2010, 2013]. Продолжение GPS-наблюдений и участвующая сейсмическая активность дали возможность проанализировать амплитуды и направления косейсмических смещений в Байкальском регионе.

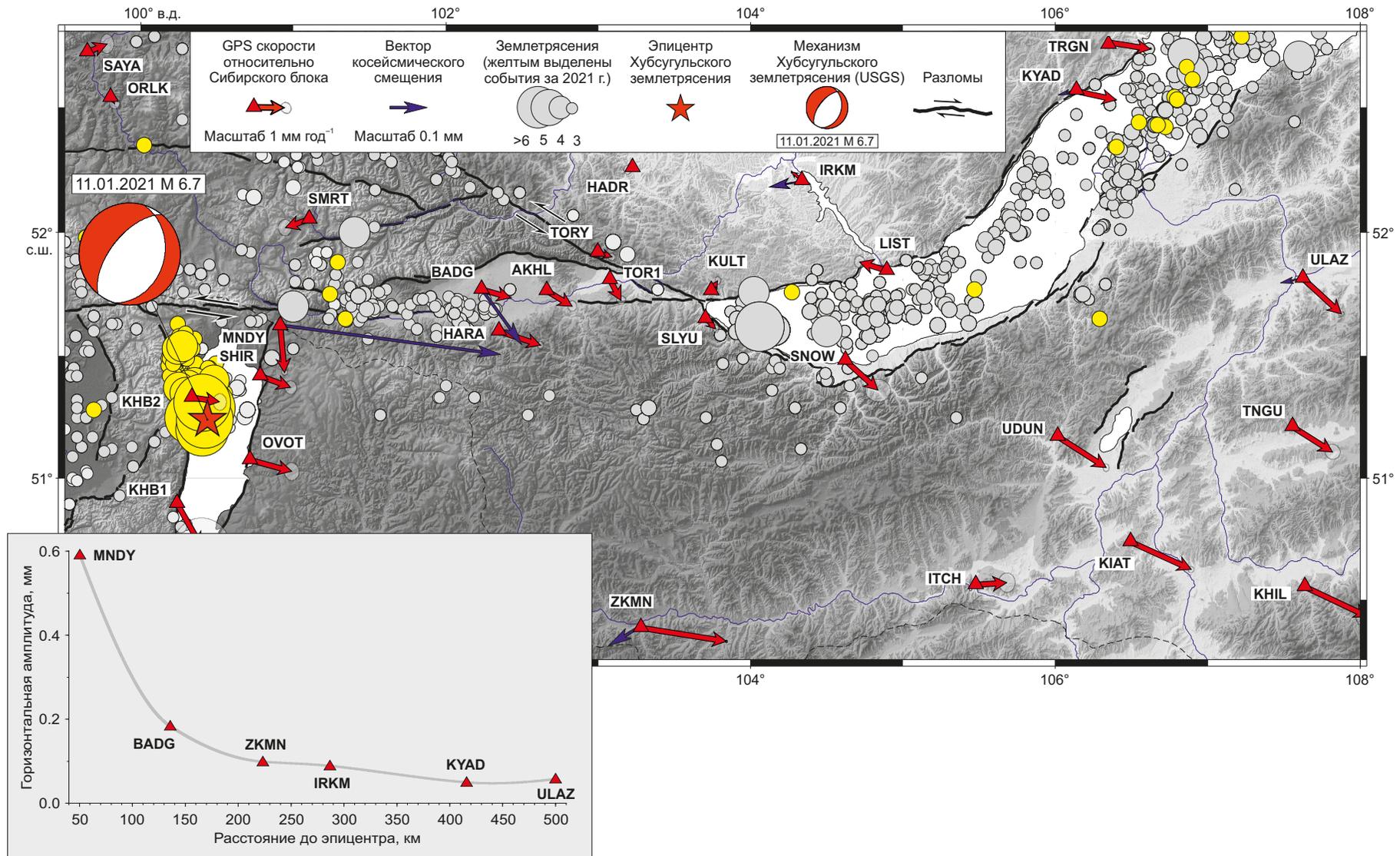
Измерения современных движений с применением метода спутниковой геодезии на Байкальском геодинамическом полигоне ведутся с 1994 г. Установка дополнительных пунктов позволила расширить сеть от центральной части БРС к периферии. На 2021 г.

насчитывалось около 150 станций измерений, шесть из них работают в постоянном режиме. Западная часть геодинамического полигона охватывает краевые части блока Сибирской платформы, Окинское нагорье, южное окончание Байкальского рифта, Тункинскую и Хубсугульскую впадины. Общее количество точек вышеупомянутого района составляет около 18 станций (рис. 1).

### 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использованы записи GPS-станций западной части Байкальского геодинамического полигона, на которых в момент сейсмического события 11 января 2021 г. велись непрерывные наблюдения (рис. 1). Для расчета косейсмических смещений были обработаны непрерывные записи с односекундным интервалом времени (KYAD, ULAZ, TRGN, ZKMN), на остальных станциях – с 30-секундным. Используемый для обработки данных файл записи точных эфемерид спутников разбит на 30-секундные интервалы, поэтому временной интервал записи всех GPS-станций с записью в 1 с был искусственно «загрублен» (передискретизирован) в 30-секундные ряды. Уменьшение частоты дискретизации позволило сделать единообразные записи сигнала.

В исследовании была использована программа TRACK, один из модулей пакета GAMIT/GLOBK [Herring et al., 2018] для анализа геодезических данных, которая позволяет обрабатывать GPS-записи в кинематическом режиме для получения временных рядов пространственного положения станции. При расчетах учитывались точные навигационные IGS орбиты спутников, координаты станций ITRF14 [Altamimi et al., 2016], ионосферные поправки в формате IONEX [CDDIS, 2021] и характеристики антенн GPS-приемников. Поскольку использовался файл характеристик изменения состояния



**Рис. 1.** Юго-западный фланг Байкальской рифтовой системы с эпицентрами землетрясений (серые кружки) и пунктами GPS-измерений (красные треугольники). Красной звездочкой обозначен эпицентр Хубсугульского землетрясения (11.01.2021, M=6.7), желтыми кружочками – афтершоки Хубсугульского землетрясения и другие землетрясения, зарегистрированные в 2021 г. На нижней врезке – график зависимости амплитуды горизонтальных косейсмических смещений (в мм) от расстояния GPS-станции до эпицентра Хубсугульского землетрясения (в км).

**Fig. 1.** Southwestern flank of the Baikal rift system with earthquake epicenters (grey circles) and GPS sites (red triangles). The red asterisk denotes the epicenter of the 11 January 2021 M 6.7 Hovsgol earthquake, the yellow circles denote the aftershocks of the Hovsgol and other earthquakes recorded in 2021. The lower sidebar shows a plot of the amplitude of horizontal coseismic displacements (in mm) versus the distance of GPS site to the epicenter of the Hovsgol earthquake (in km).

атмосферы, разбитый двухчасовыми интервалами, за время которого состояние атмосферы существенно не изменялось, временной отрезок записи составлял 4 ч (2 ч до сейсмического события и 2 ч после него) на дату 11.01.2021 г. Амплитуда вычислялась на основе разницы среднего значения положения станции до и после землетрясения за вычетом «выбросов».

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассчитанные косейсмические смещения хорошо выражены для большинства станций (IRKM, BADG, MNDY, KYAD, ZKMN, ULAZ), расположенных на разном

удалении от эпицентра Хубсугульского землетрясения. Для станций, на которых в момент Хубсугульского землетрясения велись записи, построен график зависимости горизонтальной амплитуды смещений от расстояния до эпицентра (рис. 1, нижняя врезка).

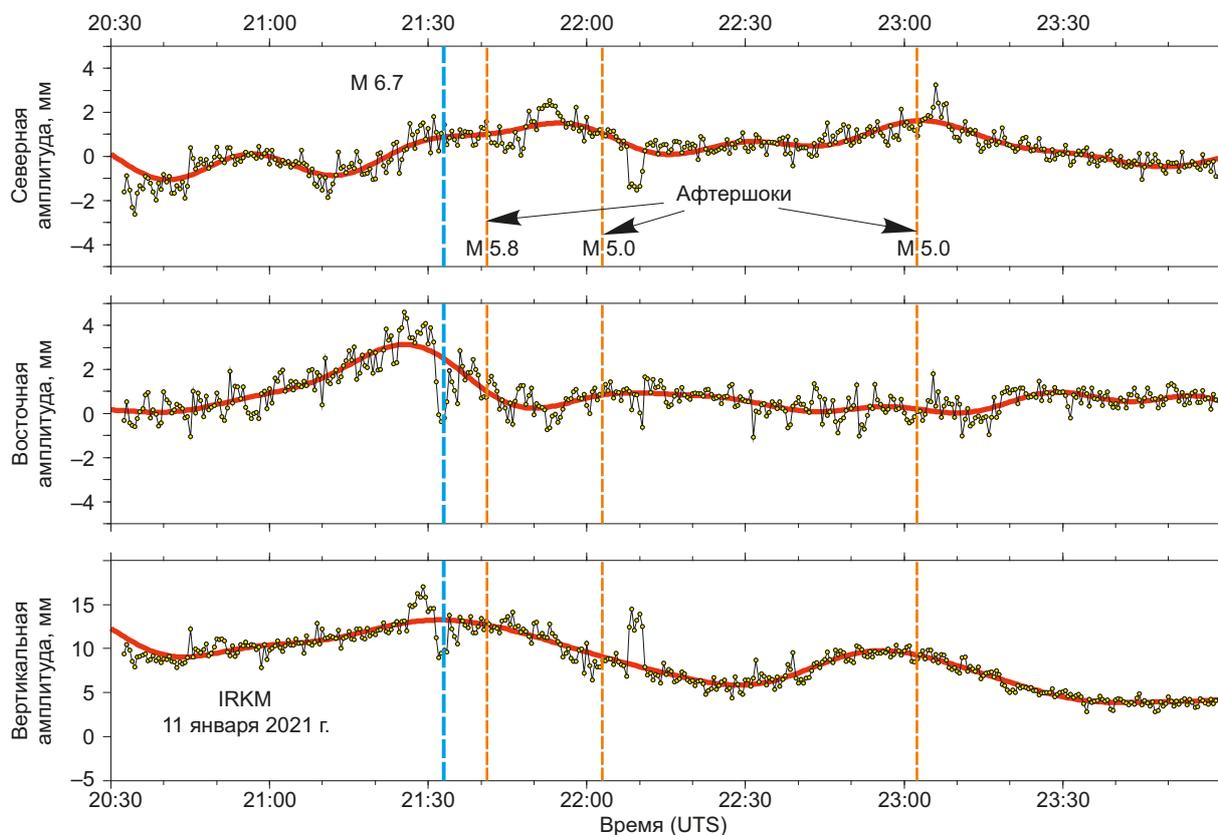
Анализ временных рядов координат станций показал, что 11.01.2021 г. все станции испытали деформационное воздействие от землетрясения (табл. 1).

Горизонтальные амплитуды смещений имеют логарифмическую зависимость от расстояния пункта до эпицентра землетрясения. Порядок амплитуды закономерно уменьшается с увеличением расстояния. Для

**Таблица 1.** Количественные параметры косейсмических смещений в момент Хубсугульского землетрясения в Монголии 11 января 2021 г.

**Table 1.** Quantitative parameters of coseismic displacements at the time of the 11 January 2021 Novsgol, Mongolia, earthquake

ID станции	Горизонтальная косейсмическая амплитуда смещений, мм	Азимут смещения, град.	Дистанция до эпицентра, км
MNDY	0.59	97.5	50.3
BADG	0.18	143.9	135.7
ZKMN	0.10	238.9	223.3
IRKM	0.09	259.9	286.6
KYAD	0.05	254.8	415.9
ULAZ	0.06	258.0	500.1



**Рис. 2.** Временные ряды GPS-станции IRKM (Иркутск) с записью с 20 ч 30 мин 11.01.2021 до 00 ч 00 мин 12.01.2021 в момент Хубсугульского землетрясения в Монголии (M=6.7). Голубая пунктирная линия – момент сейсмического события, оранжевые пунктирные линии – афтершоки.

**Fig. 2.** Permanent IRKM (Irkutsk) station time series data recorded from 20:30 on January 11, 2021 to 00:00 on January 12, 2021 during the M 6.7 Novsgol earthquake, Mongolia. A blue dotted line is the earthquake seismic moment, grey dotted lines are the aftershocks.

GPS-станции MNDY, находящейся в 50 км от эпицентра, горизонтальная амплитуда составила 0.59 мм (табл. 1), в то время как на удаленных станциях (KYAD, ULAZ и др.) амплитуды находятся в пределах сотых долей миллиметра.

В качестве примера для определения косейсмических смещений показан временной ряд станции IRKM с непрерывной регистрацией в момент Хубсугульского землетрясения (рис. 2). Анализ показал наличие смещений в пространственном положении станции, а горизонтальная амплитуда составила 0.09 мм по азимуту 260°. Отметим, что для пункта IRKM, находящегося в 287 км от эпицентра, положение станции начало плавно изменяться примерно за 10 мин до землетрясения. На графике видно, что после достижения максимума произошло резкое снижение значений в кривой временного ряда, а в точке минимума как раз и произошел главный сейсмический удар.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты определения горизонтальных амплитуд и направлений косейсмических смещений. GPS-станции, расположенные в северо-западной части Амурской плиты (ZKMN, ULAZ), показывают западное и юго-западное направление горизонтальных косейсмических смещений с амплитудами 0.10 и 0.06 мм соответственно. При скорости тектонических движений забайкальских GPS-станций относительно Сибирского блока 1.5 мм/год в юго-восточном направлении косейсмические смещения составляют сотые доли миллиметра. Станции южной оконечности Сибирского блока (KYAD, IRKM) в момент сейсмического события испытали резкие горизонтальные смещения в западном направлении. Наибольшие амплитуды горизонтальных косейсмических смещений приходятся на район сочленения Хубсугульской и Тункинской впадин. Так, для GPS-станций MNDY и BADG вектор смещений направлен на юго-восток с амплитудами 0.59 и 0.18 мм соответственно.

Относительно высокие амплитуды смещений станций, расположенных вблизи эпицентра Хубсугульского землетрясения, обусловлены максимальными значениями деформаций сжатия (дилатации). «Хубсугульские» пункты находятся в «запертом тектоническом пространстве» и не имеют возможности смещаться, в то время как GPS-пункты в районе Тункинской впадины и западной оконечности оз. Байкал не находятся в критическом напряженно-деформированном состоянии и имеют большую вариабельность смещений.

Зона сочленения Хубсугульской и Тункинской рифтовых впадин вовлечена в сеймотектонические деформации, что подтверждается косейсмическими смещениями и высокими скоростями дилатации [Lukhnev et al., 2021]. Данный факт косвенно подтверждается высокими значениями горизонтальных косейсмических амплитуд станций MNDY (0.59 мм) и BADG (0.18 мм) и их юго-восточным вектором смещений в отличие от

пунктов IRKM (0.09 мм) и KYAD (0.05 мм), расположенных в краевой части слабдеформируемого Сибирского блока.

Данный подход к решению геодинимической задачи может быть использован для оперативного получения параметров косейсмических смещений на урбанизированных сейсмоактивных территориях. Для точной оценки косейсмических и постсейсмических деформаций необходима более плотная сеть GPS-пунктов с постоянным режимом записи. Кроме того, знание кинематических особенностей косейсмических процессов и их параметров представляет ценность при определении поправок для расчетов скоростей тектонических деформаций.

#### 5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

#### 6. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

#### 7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Chernukhov V.V., Lukhnev A.V., Zalutsky V.T., 1998. Ionospheric Effects of the Solar Eclipse of March 9, 1997, as Deduced from GPS Data. *Geophysical Research Letters* 25 (4), 465–468. <https://doi.org/10.1029/98gl00186>.

Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Xavier C., 2016. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121 (8), 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>.

Bock Y., Melgar D., Crowell B.W., 2011. Real-Time Strong-Motion Broadband Displacements from Collocated GPS and Accelerometers. *Bulletin of the Seismological Society of America* 101 (6), 2904–2925. <https://doi.org/10.1785/0120110007>.

Calais E., Freed A., Mattioli G., Amelung F., Jónsson S., Jansma P., Hong S.-H., Dixon T., Prépetit C., Momplaisir R., 2010. Transpressional Rupture of an Unmapped Fault during the 2010 Haiti Earthquake. *Nature Geoscience* 3, 794–799. <https://doi.org/10.1038/NGEO992>.

Calais E., Lesne O., Devercheere J., Sankov V., Lukhnev A., Miroshnichenko A., Buddo V., Levi K., Zalutsky V., Bashkuev Y., 1998. Crustal Deformation in the Baikal Rift from GPS Measurements. *Geophysical Research Letters* 25 (21), 4003–4006. <https://doi.org/10.1029/1998GL900067>.

Calais E., Vergnolle M., Sankov V., Lukhnev A., Miroshnichenko A., Amarjargal S., Deverchere J., 2003. GPS Measurements of Crustal Deformation in the Baikal-Mongolia Area

(1994–2002): Implications on Current Kinematics of Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108 (B10), 2501. <https://doi.org/10.1029/2002JB002373>.

CDDIS, 2021. Nasa's Archive of Space Geodesy Data. Available from: <http://cddis.gsfc.nasa.gov> (Last Accessed December 7, 2021).

Cervelli P.F., Fournier T., Freymueller J., Power J.A., 2006. Ground Deformation Associated with the Precursory Unrest and Early Phases of the January 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska. *Geophysical Research Letters* 33 (18). <https://doi.org/10.1029/2006GL027219>.

Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., Loukhnev A.V., Loukhneva O.F., Sankov V.A., 2017. Determination of Humidity of the Troposphere by GNSS Signals. In: G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii, Proceedings of the 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (July 3–7, 2017). Vol. 10466. SPIE, 104666N. <https://doi.org/10.1117/12.2288151>.

Dembelov M.G., Bashkuev Y.B., Lukhnev A.V., Lukhneva O.F., Sankov V.A., 2015. Diagnostics of Atmospheric Water Vapor Content According to GPS Measurements. *Atmospheric and Oceanic Optics* 28, 291–296. <https://doi.org/10.1134/S1024856015040053>.

Dembelov M.G., Lukhneva O.F., Lukhnev A.V., 2018. Determination of Tropospheric Refraction over Observation Points IRKM (Irkutsk), ULAZ (Ulan-Ude) and BADG (Badary). *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1205–1215 (in Russian) [Дембелов М.Г., Лухнева О.Ф., Лухнев А.В. Определение тропосферной рефракции над пунктами наблюдения IRKM (Иркутск), ULAZ (Улан-Удэ) и BADG (Бадары) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1205–1215]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0391>.

DeMets C., Mattioli G., Jansma P., Rogers R., Tenorio C., Turner L.H., 2007. Present Motion and Deformation of the Caribbean Plate: Constraints from New GPS Geodetic Measurements from Honduras and Nicaragua. In: P. Mann (Ed.), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Northern Central America*. Vol. 428. Geological Society of America Special Papers, p. 21–36. [https://doi.org/10.1130/2007.2428\(02\)](https://doi.org/10.1130/2007.2428(02)).

Dong D., Herring T.A., King R.W., 1998. Estimating Regional Deformation from a Combination of Space and Terrestrial Geodetic Data. *Journal of Geodesy* 72 (4), 200–214. <https://doi.org/10.1007/s001900050161>.

Dzhurik V.I., Dudarmaa T. (Eds), 2004. Complex Geophysical and Seismological Investigations in Mongolia. RCAG MAN, Ulaanbaatar–Irkutsk, 314 p.

Gili J.A., Corominas J., Rius J., 2000. Using Global Positioning System Techniques in Landslide Monitoring. *Engineering Geology* 55 (3), 167–192. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00127-1).

Herring T.A., King R.W., Floyd M., McClusky S.C., 2018. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical Report. Massachusetts Institute of Technology, 54 p. Available from: [http://geoweb.mit.edu/gg/Intro\\_GG.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf) (Last Accessed December 07, 2021).

Hudnut K.W., King N.E., Galetzka J.E., Stark K.F., Behr J.A., Aspiotes. A., van Wyk S., Moffitt R., Dockter S., Wyatt F., 2002.

Continuous GPS Observations of Postseismic Deformation Following the 16 October 1999 Hector Mine, California, Earthquake ( $M_w=7.1$ ). *Bulletin of the Seismological Society of America* 92 (4), 1403–1422. <https://doi.org/10.1785/0120000912>.

Johnson K.M., Segall P., 2004. Imaging the Ramp–Décollement Geometry of the Chelungpu Fault Using Coseismic GPS Displacements from the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake. *Tectonophysics* 378 (1–2), 123–139. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.10.020>.

Larson K., Bodin P., Gomberg J., 2003. Using 1-Hz GPS Data to Measure Deformations Caused by the Denali Fault Earthquake. *Science* 300, 1421–1424. <https://doi.org/10.1126/science.1084531>.

Lukhnev A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Byzov L.M., Sankov A.V., Bashkuev Yu.B., Dembelov M.G., Calais E., 2013. GPS-Measurements of Recent Crustal Deformation in the Junction Zone of the Rift Segments in the Central Baikal Rift System. *Russian Geology and Geophysics* 54 (11), 1417–1426. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.010>.

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>.

Lukhnev A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Sankov A.V., Byzov L.M., 2021. Tectonic Deformations and Subsequent Seismic Events in the Southwestern Flank of the Baikal Rift System Based on GPS Data. *Doklady Earth Sciences* 500, 756–760. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21090130>.

Lukhneva O.F., Dembelov M.G., Lukhnev A.V., 2016. The Determination of Atmospheric Water Content from Meteorological and GPS Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (4), 545–553 (in Russian) [Лухнева О.Ф., Дембелов М.Г., Лухнев А.В. Определение атмосферного влагосодержания по метеорологическим и GPS-данным // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 4. С. 545–553]. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0222>.

Métivier L., Collilieux X., Lercier D., Altamimi Z., Beauducel F., 2014. Global Coseismic Deformations, GNSS Time Series Analysis, and Earthquake Scaling Laws. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119 (12), 9095–9109. <https://doi.org/10.1002/2014JB011280>.

Miroshnichenko A.I., Radziminovich N.A., Lukhnev A.V., Zuev F.L., Demberel S., Erdenezul D., Ulziibat M., 2018. First Results of GPS Measurements on the Ulaanbaatar Geodynamic Testing Area. *Russian Geology and Geophysics* 59 (8), 1049–1059. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.07.023>.

Parfeevets A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Lukhnev A.V., 2002. Evolution of the Crustal Stress State of the Mongolia–Baikal Mobile Belt. *Russian Journal of Pacific Geology* 21 (1), 14–28 (in Russian) [Парфеевец А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В. Эволюция напряженного состояния земной коры Монголо-Байкальского подвижного пояса // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21. № 1. С. 14–28].

Sankov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnitchenko A.I., Dobrynina A.A., Ashurkov S.V., Byzov L.M., Dembelov M.G., Calais E., Déverchère J., 2014. Contemporary Horizontal Movements and Seismicity of the South Baikal Basin (Baikal Rift System). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50, 785–794. <https://doi.org/10.1134/S106935131406007X>.

Sankov V.A., Miroshnitchenko A.I., Levi K.G., Lukhnev A.V., Melnikov A.I., Delvaux D., 1997. Cenozoic Stress Field Evolution in the Baikal Rift Zone. *Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production* 21 (2), 435–455.

Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Parfeevets A.V., Arzhannikova A.V., Lukhnev A.V., 2004. Late Cenozoic State of Stress in the Earth's Crust of the Khubsugul Region (Northern Mongolia): Field and Experimental Evidence. *Geotectonics* 2, 78–90 (in Russian) [Саньков В.А., Мирошниченко А.И.,

Парфеевец А.В., Аржанникова А.В., Лухнев А.В. Позднекайнозойское напряженное состояние земной коры Прихубсугуля (Северная Монголия) по натурным и экспериментальным данным // *Геотектоника*. 2004. № 2. С. 78–90].

Sankov V.A., Parfeevets A.V., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., 2011. Late Cenozoic Geodynamics and Mechanical Coupling of Crustal and Upper Mantle Deformations in the Mongolia-Siberia Mobile Area. *Geotectonics* 45, 378–393. <https://doi.org/10.1134/S0016852111050049>.

Takahashi H., 2011. Static Strain and Stress Changes in Eastern Japan due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, as Derived from GPS Data. *Earth, Planets Space* 63, 42. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.049>.