

УДК 528.481:551.24

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-59-70

Измерение современных движений на станции «Талая» (юго-западная часть Байкальского рифта)

В. Ю. Тимофеев^{1*}, А. В. Тимофеев¹, Д. Г. Ардюков¹, И. С. Сизиков^{1,2}, Д. А. Носов^{1,2}

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

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

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

Аннотация. Скорости современных движений являются важным фактором современной геодинамики Байкальской рифтовой системы. Сложным остается вопрос отражения сильных землетрясений в экспериментальных значениях смещений, а также вопрос о современных вертикальных движениях. По данным измерений 1992–2022 гг., выполненными методами абсолютной гравиметрии и космической геодезии, определены скорости вертикальных и горизонтальных движений на сейсмостанции «Талая» (Байкальский рифт). Относительно пункта Иркутск (Сибирская платформа) скорость смещения составляет 1,7–1,9 мм/год на юго-восток-восток (ЮВВ). Комплексом методов получены значения вертикальной скорости для разных эпох: перед, в момент и после Култукского землетрясения (2008 г., $M = 6,3$, 25 км до эпицентра). Скорости опускания изменяются от 1,1 до 3,3 мм/год. Выявлены возможные признаки подготовки байкальских землетрясений.

Ключевые слова: Байкальский рифт, абсолютная гравиметрия, космическая геодезия, скорости горизонтальных и вертикальных смещений, землетрясения

Введение

Недавние разрушительные землетрясения в Турции и Сирии вновь подчеркивают важность научных исследований в сейсмически активных регионах мира, при этом многолетние геодезические и гравиметрические измерения современных движений в Байкальском регионе сохраняют свою актуальность.

Байкальская рифтовая система (БРС) отличается сложным строением, высокой сейсмичностью и имеет интересную геологическую историю (рис. 1).

Точками на рис. 1 отмечены 120 тыс. событий (землетрясений класса $K \geq 7$), зарегистрированных за инструментальный период начиная с 1950 г.

Схематично показано положение озера Байкал, сейсмостанции «Талая» (Т) на юго-западной оконечности озера, прямоугольный блок (150 × 75 км) с пунктом наблюдений (пунктирная линия), выделена юго-западная часть БРС (квадрат). Сильные события на этой территории отмечались в вариациях

наклонов, деформаций, поля силы тяжести и смещений на станции.

Образование и развитие БРС связано со значительными смещениями земной коры и сопровождается активной сейсмичностью [1–5].

Оценки скорости раскрытия Байкала и величины горизонтальных смещений западной части Амурской плиты известны по геологическим данным и по современным определениям [6–9] и находятся в диапазоне от 1 до 4 мм в год.

Исходя из геологических оценок, скорости опускания отдельных частей БРС составляют от 0,1 до 7 мм/год.

Задачи наших исследований – это определение величины скорости современных 3D-смещений в юго-западной части БРС в районе сейсмостанции «Талая» на основе многолетних наблюдений методами космической геодезии и абсолютной гравиметрии, иллюстрация возможностей комплекса методов при изучении землетрясений, сравнение полученных величин скоростей с геологическими оценками.

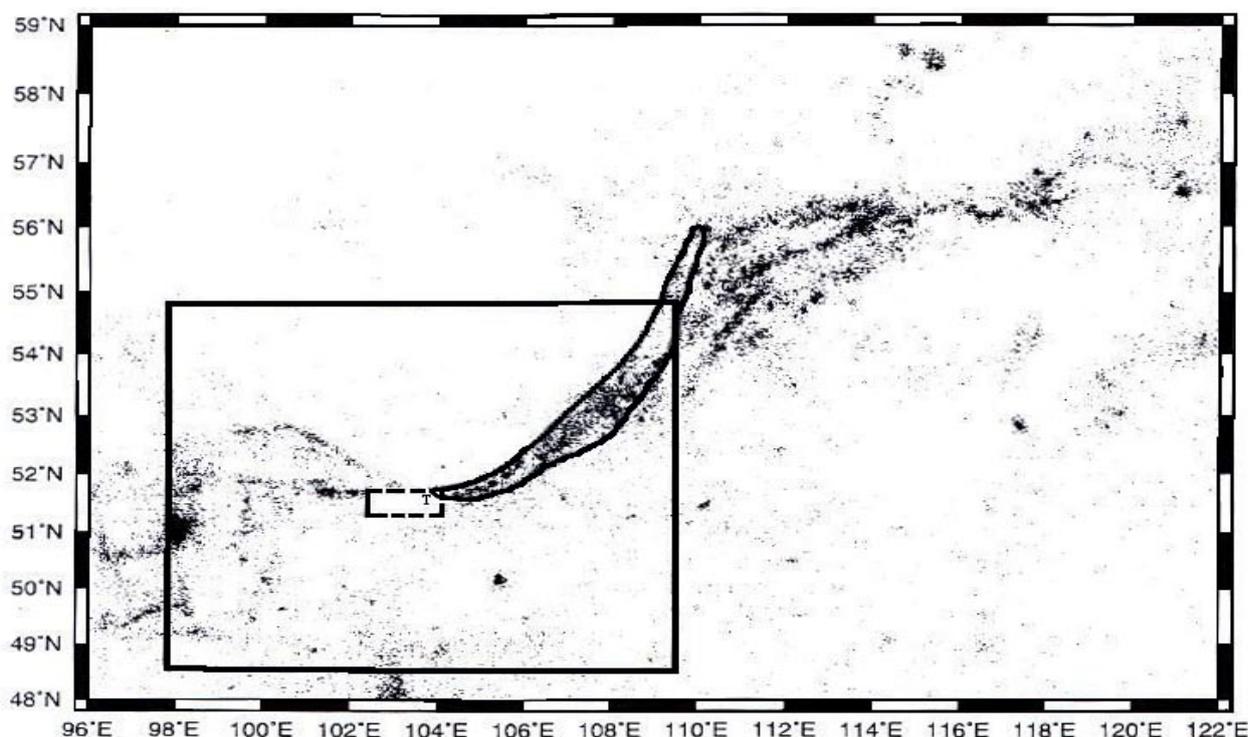


Рис. 1. Сейсмичность Байкальской рифтовой зоны [10]

Методика измерений

Исследования современных движений земной коры в Байкальском регионе активно проводились в прошлом столетии методами нивелирования и триангуляции [11–13]. Сложный горный рельеф, наличие водоемов, рек, озера Байкал и небольшая длина линий по его берегам не позволили получить однозначного представления о современных смещениях в регионе. В последние десятилетия с появлением новых технологий удалось значительно расширить возможности изучения современных движений [8, 14–19]. В юго-западной части БРС на сейсмостанции «Талая» осенью 1992 г. начаты измерения с использованием различных модификаций абсолютного гравиметра «ГАБЛ», разработанного в Институте автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО РАН [17, 20, 21]. Измерения проводились на массивном постаменте в специальном подвале глубиной 3 м. Продолжительность гравиметрических измерений обычно около недели. В результаты вводились все поправки, рекомендованные международными центрами для высокоточных измерений. От-

сутствие влияния на результаты вариаций уровня воды в скважине, расположенной в ста метрах от пункта наблюдений, и изменений локальных деформаций, охватывающих глубины от ста метров до нескольких километров, показано в работе [18]. Ежегодные гравиметрические измерения проводились с 1992 по 2014 г., пока на пункте было постоянное электронабжение.

Измерение смещений методом GPS на станции начинается с весны 2000 г. Специальный столб для размещения антенны расположен в 300 м от здания сейсмостанции вверх по долине, где была найдена площадка с открытым небом. Измерения с помощью двухчастотного приемника TRIMBLE-4700 проводились сериями от 3 до 7 суток непрерывно. Результаты многолетних измерений обрабатывались с помощью программ GAMIT-GLOBK разных модификаций. Помимо ежегодных измерений на сейсмостанции «Талая» (TALY) гравиметрические измерения проводились на пунктах, расположенных на окраине Сибирской платформы, в Иркутске (IRKT, координаты 52,22 °N, 104,32 °E) и в Листвянке (LIST, 51,85 °N, 104,89 °E)

(рис. 2). Ошибка отдельного измерения для гравиметрических данных составляла от 0,5 до 2 мкгал (рис. 3). Изменения, зарегистрированные на станции «Талая», достигали 25 мкгал.

Анализируются результаты, полученные методом космической геодезии на пунктах в Иркутске (IRKT, IRKJ, координаты 52,22 °N, 104,32 °E), Слюдянке (SLYU, координаты 51,65 °N, 103,70 °E) и Ангасолке (KULT, координаты 51,77 °N, 103,74 °E) (см.

рис. 2). В анализе смещений использованы результаты постоянной станции в Иркутске (IRKT 1996–2010 гг. и IRKJ 2002–2010 гг.). Также анализировались результаты счета для станции «Иркутск» по сериям, полученным в периоды измерений на станции «Талая» в период 2000–2022 гг. Ошибка определения скорости горизонтального смещения составляла от 0,5 до 1,3 мм, вертикальные скорости имели ошибку в 2–3 раза выше.

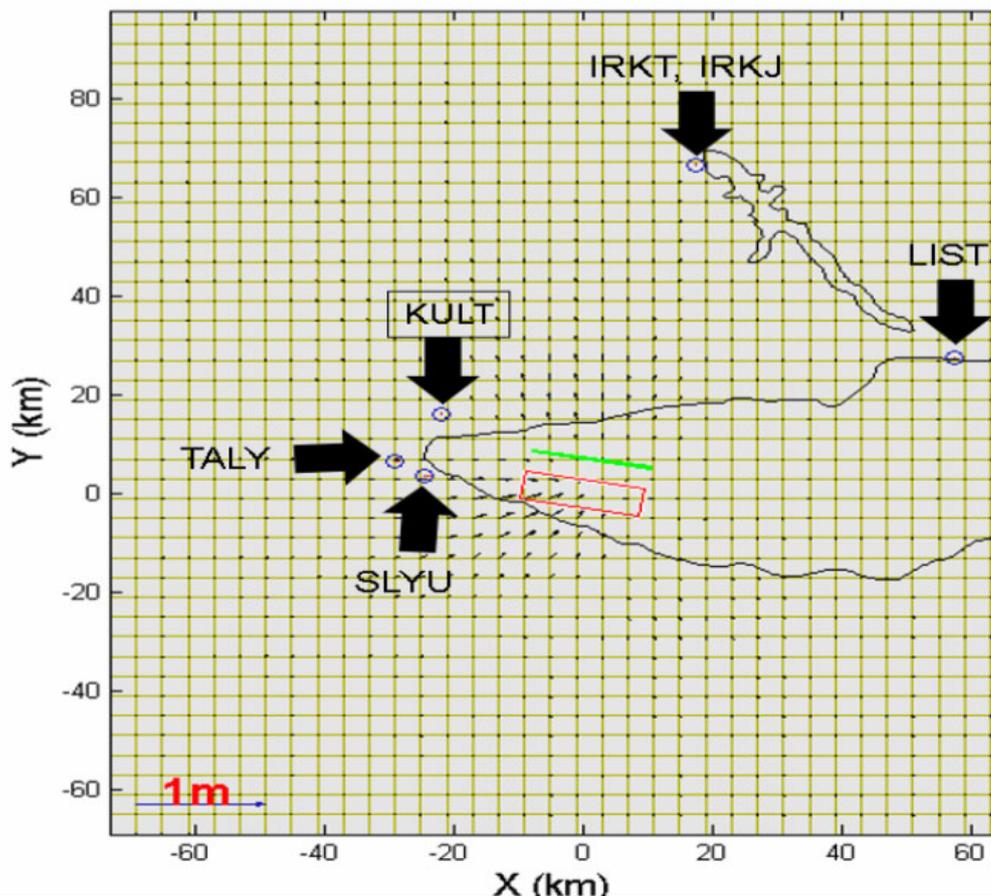


Рис. 2. Положение пунктов измерений на окраине Сибирской платформы в Иркутске (IRKT, IRKJ), в Листвянке (LIST), Ангасолке (KULT) и в области Байкальского рифта на сеймостанции «Талая» (TALY), в Слюдянке (SLYU). Расстояние в километрах от эпицентра Култукского землетрясения 27.08.2008 (M = 6,3). Показаны границы озера Байкал и Иркутского водохранилища

Как уже отмечалось, Байкальский регион отличается высокой сейсмической активностью (см. рис. 1). За период инструментальных наблюдений (1950–2022 гг.) здесь зарегистрированы несколько землетрясений магнитудой более 7. В эпоху измерений с 1992 по 2022 г. в окрестностях сеймостанции «Та-

лая» случилось несколько сильных землетрясений. Наиболее значимое по последствиям Култукское землетрясение магнитудой 6,3 произошло в акватории озера Байкал 27.08.2008 в 25 км от станции, где отмечена сильная вибрация, разрушение печей и кирпичных труб в домах.



Рис. 3. Результаты гравиметрических наблюдений на пунктах «Талая», «Иркутск» и «Листвянка». Вертикальная шкала – микрогалы. Вертикальная штриховая линия – момент Култукского землетрясения 27.08.2008

Обсуждение результатов

Положение станции «Талая» (TALY, 51,68 °N, 103,64 °E) в нескольких километрах южнее Главного Саянского разлома – границы Сибирской платформы и БРС – определяет сложный характер локального деформирования. Результаты геоцентрического решения для горизонтальных смещений для станций региона приведены в таблице. Здесь же показаны разности геоцентрических решений для смещений пунктов БРС относительно Сибирской платформы. Для разных эпох и разных систем отсчета получена скорость от 0,41 до 1,10 мм/год для смещений на юг и от 1,48 до 2,47 мм/год для смещений на восток. В пределах ошибки определения скорости смещений для пунктов TALY и SLYU совпадают. Следует отметить смещение пункта KULT, расположенного на северном борту Главного Саянского разлома, относительно пункта SLYU в эпоху 1994–2014 гг., включающую сильные землетрясения 1999 г. и 2008 г. В период 1994–2002 гг. на разломе отмечено

торможение смещений, а относительные смещения составили: $0,1 \pm 0,2$ мм/год (N), $0,4 \pm 0,2$ мм/год (E), $0,1 \pm 1,4$ мм/год (V), $0,2 \pm 0,2$ мм/год (L) [22]. Возможно, блокировка связана с Южно-Байкальским землетрясением 25.02.1999 (координаты эпицентра 51,63 °N, 104,89 °E), случившимся в 89 км к востоку от станции «Талая». Смещения пункта «Талая» относительно станции «Иркутск» определены для периода 2000–2010 гг. При этом для эпохи 2000–2008 гг. относительные скорости достигали 0,66 мм/год на юг и 1,68 мм/год на восток. Здесь хорошо проявляются косейсмические 3D-смещения при Култукском землетрясении 27.08.2008 ($M = 6,3$, координаты 51,62 °N, 104,06 °E).

Для вертикальной составляющей скорости смещений за период 2000–2008 гг. в среднем зарегистрировано опускание 2,3 мм/год, для отдельных периодов, например, 2000–2004 гг., получена скорость 3,2 мм/год, а далее до землетрясения (2004–2008 гг.) фиксируется остановка вертикальных движений (рис. 4, 5).

На рис. 4 геоцентрическое решение, плитное движение не снято. Сверху вниз: скачок при Култукском землетрясении 2008 г. (-2 ± 2 мм на юг); скачок при Култукском землетрясении на восток ($+10 \pm 2$ мм); вертикаль-

ное смещение (+ вверх), интегральный скачок при Култукском землетрясении – опускание пункта (-15 ± 5 мм). Вертикальная шкала в метрах, горизонтальная шкала – время с июня 2004 г. по июнь 2010 г.

Координаты и скорости горизонтальных смещений в геоцентрической системе координат и разности относительно стабильной Сибирской платформы, мм/год

Сибирская платформа								
$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	Пункт	V_φ	V_λ	Ошибка V_φ	Ошибка V_λ	Эпоха, гг.	Источник
52,22	104,32	IRKT	-6,61	24,85	0,003	0,006	1995–2010	[23]
52,22	104,32	IRKJ	-6,27	24,77	0,007	0,012	2002–2010	[23]
52,22	104,32	IRKT	-6,53	25,04	0,05	0,05	2000–2014	–
52,22	104,32	IRKJ	-6,65	25,86	0,14	0,21	2008–2022	–
51,77	103,74	KULT	-6,19	25,49	0,26	0,24	1994–2014	ITRF-2008 [24] ITRF-2014
			-6,25	25,70	0,16	0,12		
Байкальская рифтовая система								
51,68	103,64	TALY	-7,14	27,51	0,07	0,08	2000–2015	ITRF-2008
			-7,51	26,59	0,39	0,38	2009–2015	ITRF-2008
			-7,66	27,81	0,24	0,29	2007–2022	ITRF-2014
–	–	Разн. (7–3)	-0,41	2,47	0,12	0,13	2000–2015	ITRF-2008
–	–	Разн. (8–3)	-0,98	1,55	0,39	0,38	2009–2015	ITRF-2008
–	–	TALY-IRKT	-0,85	1,73	0,27	0,24	2009–2015	Счет относительно Иркутска
–	–	Разн. (9–4)	-1,01	1,95	0,38	0,50	2007–2022	ITRF-2014
51,65	103,70	SLYU	-7,29	26,34	0,76	1,30	1994–2014	[24]
–	–	Разн. (10–1)	-0,67	1,48	0,76	1,31	1994–2014	–
–	–	Разн. (10–2)	-1,01	1,57	0,77	1,31	1994–2014	–
–	–	Разн. (10–5)	-1,10	0,85	1,02	1,55	1994–2014	–
–	–	Разн. (10–6)	-1,04	0,64	0,92	1,43	1994–2014	–

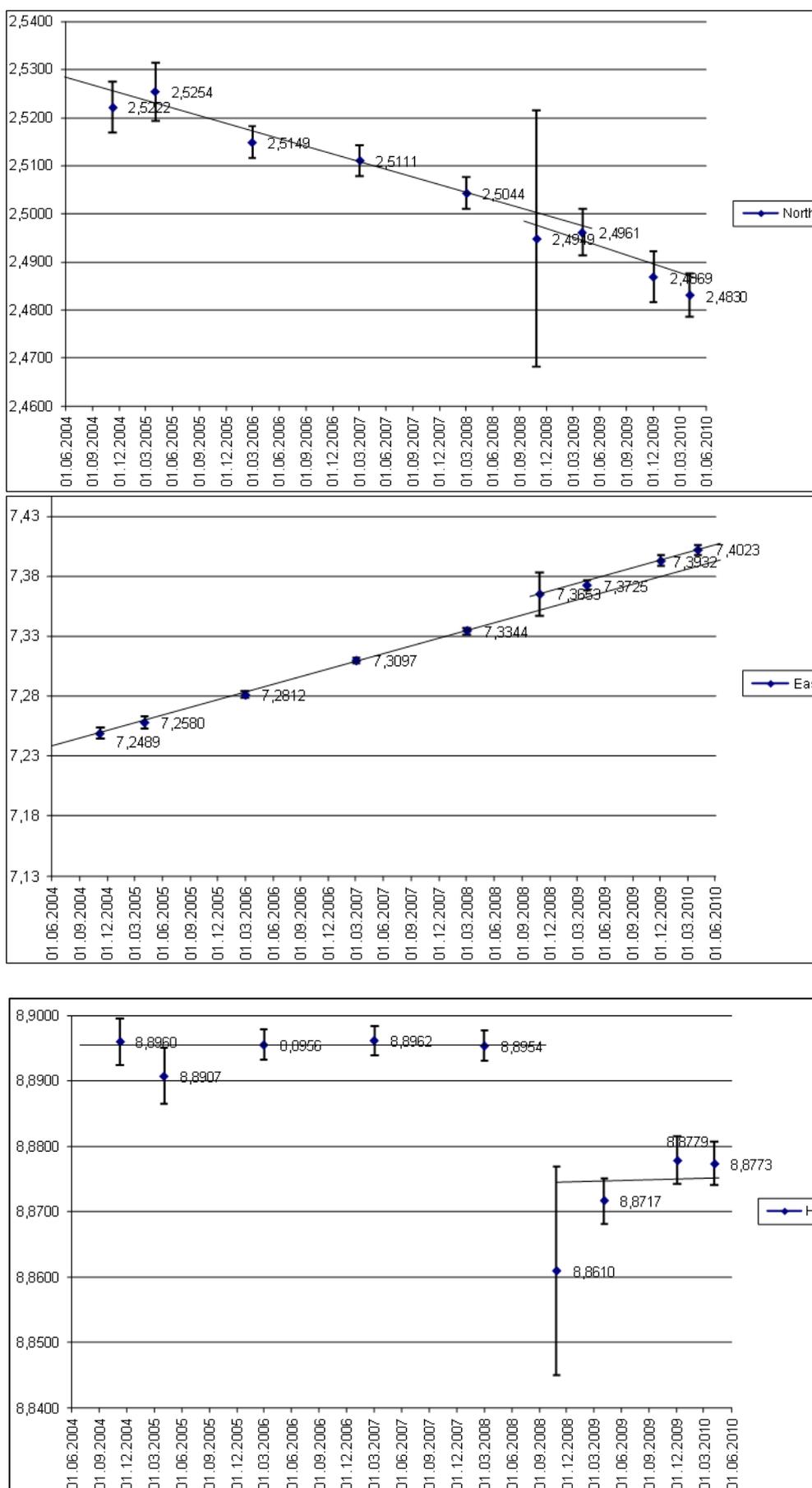


Рис. 4. Смещения пункта «Гаяя» за период 2004–2010 гг.

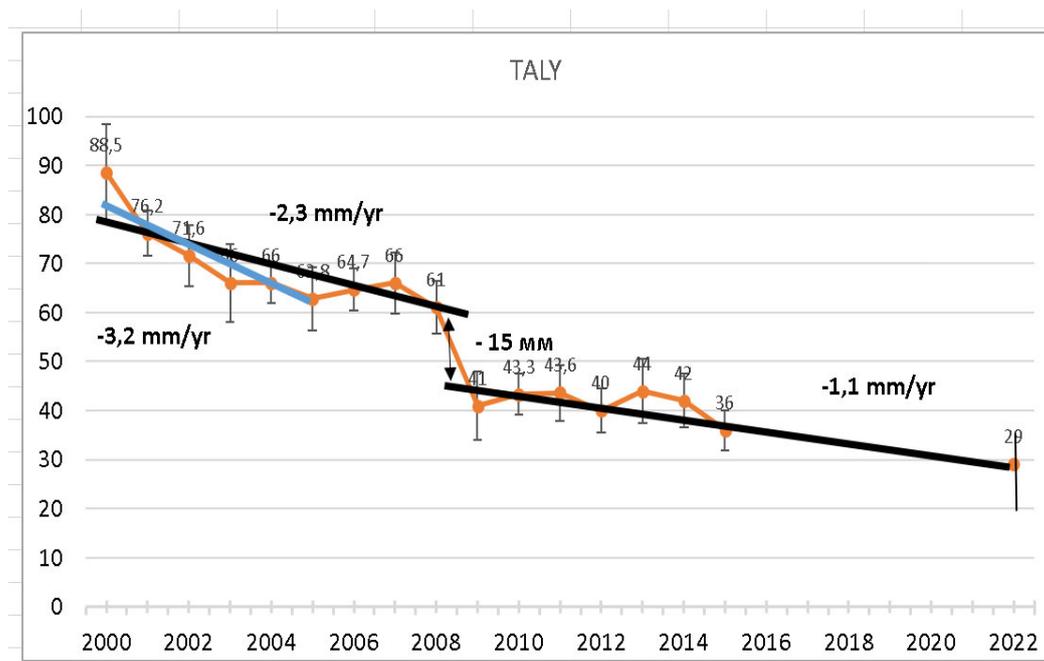


Рис. 5. Изменение высоты пункта «Талая» в мм. Период наблюдений 2000–2022 гг. График построен по данным измерений в эпоху март – апрель. Вертикальными линиями показана ошибка. Косейсмическое смещение – 15 мм

В эпоху после Култукского землетрясения (2008–2022 гг.) скорость уменьшилась до 1,1 мм/год. Средняя скорость опускания пункта за период 2000–2022 гг. составила 2,7 мм/год.

Остановку вертикального смещения пункта в период 2004–2008 гг. (см. рис. 4) можно интерпретировать как эффект, предшествующий землетрясению.

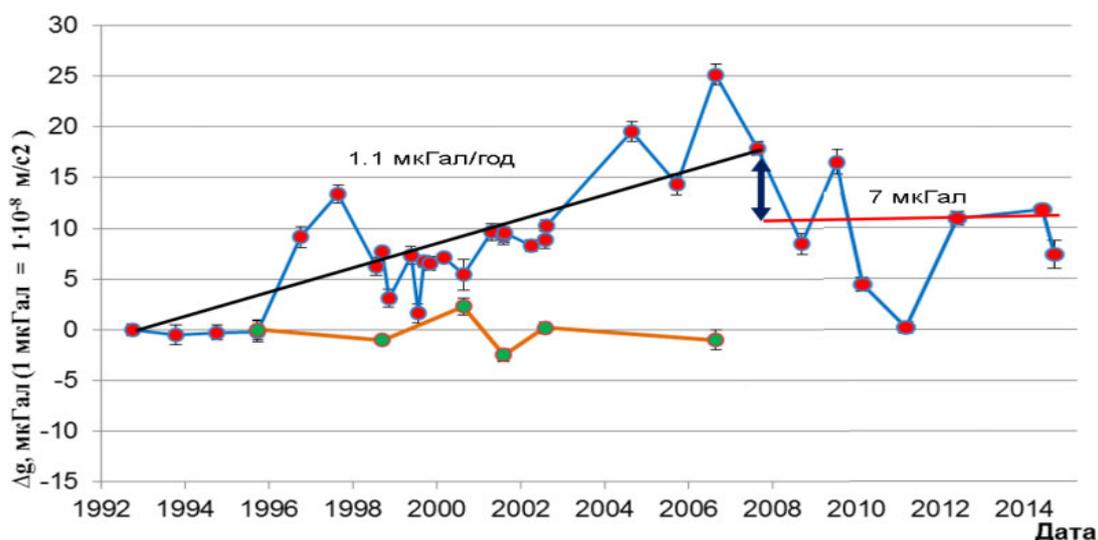


Рис. 6. Вариации значения силы тяжести на пункте «Талая» с 1992 по 2014 г. Косейсмическое изменение – 7 мкгал. Вертикальная шкала в мкгал

По результатам наблюдений за период 1992–2008 гг. отмечается увеличение значения силы тяжести со средней скоростью +1,1

мкгал/год (рис. 6). Учитывая нормальный вертикальный градиент силы тяжести (–308 мкгал/м), полученное значение соответствует

вертикальной скорости опускания пункта – 3,5 мм в год, что в пределах ошибки соответствует данным космической геодезии за период 2000–2004 гг. Уменьшение значения силы тяжести в момент землетрясения противоречит результатам, полученным методом

GPS, опусканию пункта. Рассмотрим вариации плотности. Связь силы тяжести (Δg) и изменений плотности, вызванных деформацией среды, можно описать, используя известное соотношение для притяжения бесконечного плоского слоя

$$\Delta g = 2\pi \cdot k \cdot \Delta\rho \cdot d = 2\pi \cdot k \cdot \Delta\varepsilon \cdot \rho \cdot d,$$

где $k = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$ – гравитационная постоянная; d – толщина слоя; $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ – средняя плотность земной коры; $\Delta\rho$ – изменение плотности, связанное с объемной деформацией $\Delta\varepsilon$.

Косейсмическое уменьшение значения силы тяжести можно объяснить уменьшением плотности при косейсмическом растяжении земной коры. Так, косейсмический скачок силы тяжести при объемной деформации растяжения $\Delta\varepsilon = 3 \cdot 10^{-6}$ (растяжение) и мощности слоя 35 км составит $12 \cdot 10^{-8} \text{ м}/\text{с}^2$, или 12 мкгал. Опускание пункта на 15 мм соответствует увеличению силы тяжести на 5 мкгал плюс 7 мкгал (эффект, зарегистрированный гравиметром) – получим те же 12 мкгал. Используя сейсмологические параметры Култукского землетрясения в рамках дислокационной модели [25], были определены смещения и деформации земной поверхности при Култукском землетрясении. Определения сейсмологов хорошо соответствуют нашим данным.

Выводы

Скорость современных движений земной коры является важным критерием, определяющим геодинамику Байкальской рифтовой системы. Сложным остается вопрос отражения сильных землетрясений в экспериментальных значениях смещений, а также вопрос о современных вертикальных движениях. Многолетние измерения абсолютного значения силы тяжести и смещений методом GPS (1992–2022 гг.) на сейсмостанции «Талая», расположенной в области Байкальского рифта, позволяют прояснить поставленные вопросы. В эпоху 2000–2022 гг. смещение относительно Сибирской платформы составило 1,9 мм/год с ориентацией на ЮВВ. Результат подтверждается независимыми измерениями на пункте «Слюдянка», где

скорость относительного смещения составила 1,7 мм/год на ЮВВ (1994–2014 гг.). Полученные значения раскрытия Байкальского рифта хорошо соответствуют известным данным [8, 24]. Сложность точного определения скоростей вызвана локальной сейсмичностью, т. е. наложением косейсмических смещений разной интенсивности на регистрируемые данные. Так, косейсмические смещения при Култукском землетрясении 2008 г. (магнитуда 6,3, расстояние до эпицентра 25 км) составили 2 мм на юг и 8 мм на восток. Для исключения влияния косейсмических эффектов необходимо анализировать ряды измерений продолжительностью 10–20 лет. Вертикальная многолетняя скорость опускания пункта «Талая» (1992–2008 гг.) по гравиметрическим данным составила 3,5 мм/год. Данные космической геодезии показывают вариации скорости для разных эпох: 2000–2004 гг. – 3,2 мм/год; 2000–2008 гг. – 2,3 мм/год; 2008–2009 гг. – косейсмическое опускание в 15 мм, а далее скорость снизилась до 1,1 мм/год. Средняя скорость опускания пункта «Талая» за период 2000–2022 гг. составила 2,7 мм/год. Полученные разными методами значения средних скоростей в пределах ошибки измерений неплохо согласуются. Косейсмическое уменьшение значения силы тяжести отражает уменьшение плотности в районе сейсмостанции, связанное с косейсмическим растяжением земной коры ($3 \cdot 10^{-6}$). Данные, полученные комплексом методов, хорошо соответствуют моделям, построенным по сейсмологическим данным. Из признаков, связанных с подготовкой землетрясений, можно отметить уменьшение относительной скорости смещения в зоне Главного Саянского разлома в эпоху Южно-Байкальского землетрясения 1999 г. ($M = 6,1$) и затухание вертикальных движений в эпоху, предшествующую Култукскому землетрясению 2008 г. ($M = 6,3$).

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН номер FWZZ-2022-0019 и проектов НИР ИАиЭ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Logatchev N. A., Zorin Yu. A., Rogozhina V. A. Baikal rift: Active or passive? // *Tectonophysics*. – 1983. – Vol. 94. – P. 223–240.
2. Артюшков Е. В. Физическая тектоника. – М.: Наука, 1993. – 455 с.
3. San'kov V. A., Miroshnichenko A. I., Levi K. G., Lukhnev A., Melnikov A. I., Delvaux D. Cenozoic stress field evolution in the Baikal Rift Zone // *Bulletin du Centre de recherches Elf exploration production*. – 1997. – Vol., No. 2. – P. 435–456.
4. Zorin Yu. A. The Baikal rift: an example of the intrusion of asthenospheric material into the lithosphere // *Tectonophysics*. – 1981. – Vol. 73. – P. 91–104.
5. Zonenshain L. P., Savostin L. A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // *Tectonophysics*. – 1981. – Vol. 76. – P. 1–45.
6. De Mets C., Gordon R. G., Argus D. F. Geologically current plate motions // *Geophysical Journal International*. – 2010. – Vol. 181. – P. 1–80.
7. Ashurkov S. V., Sankov V. A., Serov M. A., Luk'yanov P. Y., Grib N. N., Bordonskii G. S., Dembelov M. G., Evaluation of Present-Day Deformations in the Amurian Plate and Its Surroundings, Based on GPS Data // *Russian Geology and Geophysics*. – 2016. – Vol. 57 (11). – P. 1626–1634.
8. Sankov V. A., Lukhnev A. V., Miroshnichenko A. I., Dobrynina A. A., Ashurkov S. V., Byzov L. M., Dembelov M. G., Calais E., Déverchère J. Contemporary Horizontal Movements and Seismicity of the South Baikal Basin (Baikal Rift System) // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014. – Vol. 50 (6). – P. 785–794.
9. Lukhnev A. V., San'kov V. A., Miroshnichenko A. I., Ashurkov S. V., Calais E. GPS rotation and strain rates in the Baikal-Mongolia region // *Russian Geology and Geophysics*. – 2010. – Vol. 51 (7). – P. 1006–1017.
10. Сейсмичность БРС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://seis-bykl.ru/>.
11. Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П. К вопросу о периодичности современных вертикальных движений земной поверхности // *Методика и результаты изучения пространственно-временных вариаций геофизических полей*. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1992. – С. 148–158.
12. Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П. Современная кинематика земной поверхности юга Сибири. – Новосибирск: Наука, 1990. – 152 с.
13. Kesselman S. I., Kotliar P. E., Kuchay O. A., Tychkov S. A., Serebriakova L. I., Deformation of the surface part of the Earth's crust by seismologic and geodetic data obtained on Baikal geodynamic polygons // *Tectonophysics*. – 1992. – Vol. 202. – P. 251–256.
14. Вдовин В. С., Дворкин В. В., Карпик А. П., Липатников Л. А., Сорокин С. Д., Стеблов Г. М. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интерпретации в ITRF // *Вестник СГУГиТ*. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 6–27.
15. Карпик А. Р., Kosarev N. S., Antonovich K. M., Ganagina I. G., Timofeev V. Y. Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurements // *Geodesy and Cartography*. – 2018. – Т. 44. – № 4. – С. 140–145.
16. Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В., Бойко Е. В. Теория плитной тектоники и результаты измерений на постоянной станции космической геодезии NVSK // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 95–108.
17. Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В., Бойко Е. В., Валитов М. Г., Стусь Ю. Ф., Сизиков И. С., Носов Д. А., Калиш Е. Н. О сравнении результатов определения координат и скоростей смещения пунктов с помощью двухчастотных приемников космической геодезии // *Вестник СГУГиТ*. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 63–77.
18. Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В., Горнов П. Ю., Стусь Ю. Ф., Семибаламут В. М. Вариации объемной деформации и уровня воды в скважинах, их влияние на результаты гравиметрических измерений // *Вестник СГУГиТ*. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 40–51.
19. Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В., Валитов М. Г., Сизиков И. С., Носов Д. А., Стусь Ю. Ф. Гравиметрические исследования на научном полигоне Мыс Шульца // *Вестник СГУГиТ*. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 31–44.
20. Arnautov G. P., Kalish E. N., Smirnov M. G., Stus' Yu. F., Tarasyuk V. G. Laser ballistic gravimeter GABL-M and gravity observation results // *Avtometria*. – 1994. – No. 3. – P. 3–11.

21. Stus Y. F., Arnautov G. P., Kalish E. N., Timofeev V. Non-tidal Gravity variation // Gravity and Geoid. – Germany : Springer, 1995. – P. 35–43.
22. Саньков В. А., Чипизубов А. В., Лухнёв А. В., Смекалин О. П., Мирошниченко А. И., Кале Э., Девершер Ж. Подход к оценке опасности сильного землетрясения в зоне Главного Саянского разлома по данным GPS-геодезии и палеосейсмологии // Геология и геофизика. –2004. – Т. 11. – С. 1369–1376.
23. SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center [Electronic resource]. – Mode of access: <http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/sopac/2021>.
24. Ашурков С. В. Деформация южной части Сибирской платформы по данным GPS измерений // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13, № 1. – Режим доступа: <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0628>.
25. Toda S., Ross S., Sevilgen V., Lin J. Coulomb 3. Graphic rich deformation & stress change software for earthquake : User Guide [Electronic resource]. – 2009. – Mode of access: <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1060>.

Об авторах

Владимир Юрьевич Тимофеев – доктор физико-математических наук, зав. лабораторией.

Антон Владимирович Тимофеев – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Дмитрий Геннадьевич Ардюков – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Игорь Сергеевич Сизиков – инженер-конструктор, инженер.

Дмитрий Алексеевич Носов – инженер-программист, инженер-геодезист.

Получено 10.04.2023

© В. Ю. Тимофеев, А. В. Тимофеев, Д. Г. Ардюков,
И. С. Сизиков, Д. А. Носов, 2023

Modern displacements measurements at Talay station (south-west part of Baikal rift)

V. Y. Timofeev¹, A. V. Timofeev¹, D. G. Ardyukov¹, I. S. Sizikov^{1,2}, D. A. Nosov^{1,2}*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

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

Abstract. The rates of modern displacements are an important factor in the modern geodynamics of the Baikal rift system. Reflection of strong earthquakes in the experimental values of displacements is still to be discussed, as well as the question of modern vertical movements. According to the measurements of 1992–2022, performed by the methods of absolute gravimetry and space geodesy, the velocities of vertical and horizontal movements at the Talaya seismic station (Baikal Rift). The displacement rates were determined as 1.7 mm/year – 1.9 mm/year at the SEE relative to the Irkutsk point (Siberian platform). A set of methods was used to obtain the vertical velocity values for different epochs, pre-, co- and post-period of Kultuk earthquake (2008, M = 6.3, 25 km to the epicenter). Subsidence rates vary from 1.1 mm/yr to 3.3 mm/yr. Possible signs of the preparation of Baikal earthquakes have been identified.

Keywords: Baikal rift, absolute gravimetry, space geodesy, horizontal and vertical displacement velocities, earthquakes

REFERENCES

1. Logatchev, N. A., Zorin, Yu. A., & Rogozhina, V. A. (1983). Baikal rift: Active or passive? Tectonophysics, 94, 223–240.
2. Artyshkov, E. V. (1993). Fizicheskaya tektonika [Physical tectonics]. Moscow: Nauka Publ., 455 p. [in Russian].

3. San'kov, V. A., Miroshnichenko, A. I., Levi, K. G., Lukhnev, A., 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), 435–456.
4. Zorin, Yu. A. (1981). The Baikal rift: an example of the intrusion of asthenospheric material into the lithosphere. *Tectonophysics*, 73, 91–104.
5. Zonenshain, L. P., & Savostin L. A. (1981). Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. *Tectonophysics*, 76, 1–45.
6. De Mets, C., Gordon, R. G., & Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181, 1–80.
7. 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.
8. Sankov, V. A., Lukhnev, A. V., Miroshnichenko, 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(6), 785–794.
9. Lukhnev, A. V., San'kov, 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), 1006–1017.
10. Seismichnoct BRS. (n. d.). Retrieved from <http://seis-bykl.ru/> [in Russian].
11. Kolmogorov, V. G., & Kolmogorova, P. P. (1992). On the question of the periodicity of modern vertical movements of the earth's surface. In *Metodika i rezul'taty izucheniia prostranstvenno-vremennykh variatsii geofizicheskikh polei* [Methodology and results of studying spatio-temporal variations of geophysical fields] (pp. 148–158). Novosibirsk: United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy. SB RAS Publ. [in Russian].
12. Kolmogorov, V. G., & Kolmogorova, P. P. (1990). Modern kinematics of the earth's surface in southern Siberia [Sovremenai kinematika zemnoi poverhnosti yga Sibiri]. Novosibirsk: Nauka Publ., 152 p. [in Russian].
13. Kesselman, S. I., Kotliar, P. E., Kuchay, O. A., Tychkov, S. A., & Serebriakova, L. I. (1992). Deformation of the surface part of the Earth's crust by seismologic and geodetic data obtained on Baikal geodynamic polygons. *Tectonophysics*, 202, 251–256.
14. Vdovin, V. S., Dvorkin, V. V., Karpik, A. P., Lipatnikov, L. A., Sorokin, S. D., & Steblov, G. M. (2018). Current State and Future Development of Active Satellite Geodetic Networks in Russia and Their Integration into ITRF. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 6–27 [in Russian].
15. Karpik, A. P., Kosarev, N. S., Antonovich, K. M., Ganagina, I. G., & Timofeev, V. Y. (2018). Operational experience of GNSS receivers with chip scale atomic clocks for baseline measurements. *Geodesy and Cartography*, 44(4), 140–145.
16. Timofeev, V. Y., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., & Boyko, E. V. (2019). Plate tectonic theory and NVSK permanent space geodesy station. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 95–108 [in Russian].
17. Timofeev, V. Ju., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., Boyko, E. V., Valitov, M. G., Stus, Y. F., Sizikov, I. S., Nosov, D. A., & Kalish, E. N. (2020). Comparison of coordinates and current rates estimations by dual frequency receivers observation. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(2), 63–77 [in Russian].
18. Timofeev, V. Y., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., Gornov, P. Y., Stus, Y. F., & Semibalamut, V. M. (2021). Volume deformation variations and well-aquifer response, its connection with gravity measurements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(5), 40–51 [in Russian].
19. Timofeev, V. Y., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., Valitov, M. G., Sizikov, I. S., Nosov, D. A., & Stus, Yu. F. (2022). Gravity observation at Shults cape polygon. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(4), 31–44 [in Russian].
20. Arnautov, G. P., Kalish, E. N., Smirnov, M. G., Stus', Yu. F., & Tarasyuk, V. G. (1994). Laser ballistic gravimeter GABL-M and gravity observation results. *Avtometriya*, 3, 3–11.
21. Stus, Y. F., Arnautov, G. P., Kalish, E. N., & Timofeev, V. Y. (1995). Non-tidal Gravity variation. *Gravity and Geoid* (pp. 35–43). Germany: Springer.
22. San'kov, V. A., Chipizubov, A. V., Lukhnev, A. V., Smekalkin, O. P., Miroshnichenko, A. I., Calais, E., & Déverchère, J. (2004). Estimation of seismic dangers for Main Sayan Fault by GPS-data and paleoseismology results. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, 11, 1369–1376 [in Russian].
23. SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center. (n. d.). Retrieved from <http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/sopac/2021>.

24. Ashurkov, S. V. (2022). Strain rates for the southern Siberian craton derived from GPS measurements. *Geodinamika i tektonofizika [Geodynamics & Tectonophysics]*, 13(1) [in Russian].

25. Toda, S., Ross, S., Sevilgen, V., & Lin, J. (2009). Coulomb 3. Graphic rich deformation & stress change software for earthquake. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1060>.

Author details

Vladimir Y. Timofeev – D. Sc., Chief of Laboratory.

Anton V. Timofeev – Ph. D., Senior Researcher.

Dmitriy G. Ardyukov – Ph. D., Senior Researcher.

Igor S. Sizikov – Design Engineer.

Dmitrii A. Nosov – Software Engineer, Geodetic Engineer.

Received 10.04.2023

© *V. Y. Timofeev, A. V. Timofeev, D. G. Ardyukov,
I. S. Sizikov, D. A. Nosov, 2023*