

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ НА КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЕ (КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ И ГРАВИМЕТРИЯ)*

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Евгений Николаевич Калиш

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-25-96, e-mail: kalish@iae.nsk.su

Максим Георгиевич Валитов

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Россия, г. Владивосток, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией

Юрий Фёдорович Стусь

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Руслан Григорьевич Кулинич

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Россия, г. Владивосток, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Павел Юрьевич Горнов

Институт тектоники и геофизики им. Косыгина ДВО РАН, Россия, г. Хабаровск, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, timofeevav@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Алексеевич Носов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, e-mail: danossov@ngs.ru

Игорь Сергеевич Сизиков

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-конструктор, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

* Работа была выполнена в рамках Интеграционного проекта СО РАН № 76, проекта Президиума РАН № 4.1 и Программы РАН ОНЗ 6–2.

Исследования методами космической геодезии (GPS) и гравиметрии на Дальнем Востоке России (в Приморье, Хабаровском крае и на Сахалине) активно развиваются в последнее десятилетие. Наши GPS-измерения проводились по профилям, расположенным на севере Приморья и в Хабаровском крае в период с 2003 г. по 2014 г. Эти данные были дополнены результатами, полученными в институтах ДВО РАН. Комплексные гравиметрические исследований проводились в 2010–2014 гг. на полигоне «мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН. В измерениях использованы относительные и абсолютные гравиметры. Модели приливной деформации для региона анализируются по данным измерений. Измерения методом GPS и абсолютной гравиметрии позволили определить и проанализировать величину косейсмических смещений в дальней зоне Японского землетрясения 11.03.2011 ($M = 9$).

Ключевые слова: относительные и абсолютные гравиметры, приливные модели Земли, методы космической геодезии, косейсмические эффекты в дальней зоне.

COSEISMIC EFFECT AT CONTINENTAL BORDERLANDS (SPACE GEODESY AND GRAVITY MEASUREMENT)

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Doctor of Science, Chief of the Laboratory, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Eugenii N. Kalish

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, tel. (383)333-25-96, e-mail: kalish@iae.nsk.su

Maxsim G. Valitov

V. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Russia, Vladivostok, Ph. D., Chief of the Laboratory

Yurii F. Stus

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker

Ruslan G. Kulinich

V. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Russia, Vladivostok, Doctor of Science, Senior Scientific Worker

Dmitrii G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Pavel Yu. Gornov

ITG FEB RAS, Ph. D., Senior Scientific Worker, Russia, Khabarovsk

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Scientific Worker, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Dmitrii A. Nosov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospect, Engineer, e-mail: danossov@ngs.ru

Igor S. Sizikov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospect, Engineer, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

We used GPS method for navigation measurement at Far East of Russia from 2003 to 2014. Gravity observation was developed at the points at Shults cape. Observation started in 2010 year. We used absolute gravimeter and relative gravimeter for measurements. Different tidal models were examined by measurements. Space geodesy and gravity methods were used for the study of coseismic effect at the far zone of Japan earthquake 11.03.2011 ($M = 9$).

Key words: absolute and relative gravimeters, Earth tidal model, space geodesy method, coseismic effect at the far zone.

Методы космической геодезии и гравиметрии активно применяются при исследованиях на Дальнем Востоке России (в Приморье, Хабаровском крае и на Сахалине). В основе комплексирования методов лежит появившаяся возможность равнозначности измерений. Микрогальная гравиметрия соответствует миллиметровой точности GPS-измерений. Основная цель исследований направлена на изучение деформаций Земли, вызванных приливными и тектоническими силами, порождающими временные вариации смещений и нерегулярные изменения силы тяжести в условиях окраины континента. Мощная сейсмическая активность региона позволяет получить значимые косейсмические эффекты даже на расстояниях в сотни километров от эпицентра.

В нашей работе представлены результаты измерений в дальней зоне Японского землетрясения (Tohoku-Oki) 11 марта 2011 года ($M_w = 9.0$). Наши GPS измерения проводились по профилям, расположенным на севере Приморья и в Хабаровском крае. Комплексные гравиметрические исследований проводились в 2010–2014 гг. на ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». В измерениях использованы относительные и абсолютные гравиметры микрогального уровня. Приливные вариации, зарегистрированные относительным гравиметром, были проанализированы по суточным и полусуточным волнам (O_1 и M_2). В измерениях использованы два типа приливных цифровых гравиметров. Анализировались девять приливных моделей океана: GSR3, GSR4, FES95, FES02, FES04, GOT00, NAO99, ORI96 и TPX06. Теоретическая модель TPX06 для океана и модель DDW99 для Земли были выбраны в результате анализа экспериментальных данных. Эти модели использованы в дальнейшем для определения поправок в результаты абсолютных гравиметрических измерений на мысе Шульца. Пример анализа результатов приведен в табл. 1. Результаты приливного анализа (табл. 2), в виде приливных поправок, как и другие обязательные поправки, использованы при обработке данных абсолютного баллистического лазерного гравиметра ГАБЛ (рис. 1).

Таблица 1

Сравнение результатов, полученных с помощью гравиметра SCINTREX CG5 с моделью (статическая + динамическая части)

Волна	Модель DDW99 (не гидрост.) + 6 океан. моделей		SCINTREX CG-5 40301 (2010/04-2010/07) 87 дней		Сравнение	
	δ_0	$\alpha_0(^{\circ})$	δ_1	$\alpha_1(^{\circ})$	δ_1/δ_0	$\alpha_1(^{\circ})-\alpha_0(^{\circ})$
O1	1.17615	+0.416	1.1823	+0.157	1.0052	0.259
			± 0.0052	± 0.029		
M2	1.17494	+0.496	1.1687	+0.474	0.9947	0.022
			± 0.0041	± 0.023		
M2/O1	0.9990		0.9885			

Таблица 2

Результаты по гравиметру g-Phone 111 и модель (654 дня, 06/2012–04/2014)

	Амплитуда	δ -фактор	Модель	Фазовый сдвиг	Модель
O1	349.922	1.1630 ± 0.0006	1.17615	$+0.12^{\circ} \pm 0.03^{\circ}$	$+0.416^{\circ}$
M2	458.047	1.1663 ± 0.0004	1.17494	$+1.01^{\circ} \pm 0.02^{\circ}$	$+0.496^{\circ}$

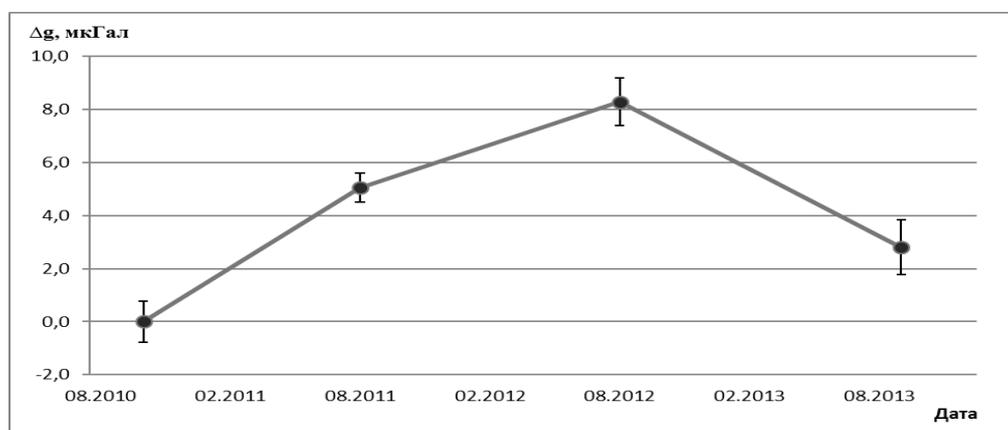


Рис. 1. Данные измерений абсолютным гравиметром ГАБЛ с 2010 года по 2013 год (переменная часть в микрогалах) на мысе Шульца

В результате измерений гравиметром ГАБЛ за период 2010, 2011, 2012 и 2013 годы установлено, что в течение первого года абсолютное значение g на пункте возросло на 5.0 мкГал. При этом среднеквадратическая погрешность определения g не превышала 1–2 мкГал. Измерения методом космической геодезии позволили определить величину косейсмических смещений в дальней

зоне. Пример скачка смещений на базовом пункте Змейка (ZMEY, 60 км на ЮВ от г. Хабаровска) приведен на рис. 2. Скачок горизонтальных смещений в зависимости от расстояния до эпицентра получен на уровне от 40 до 10 мм (рис. 3). Известна связь гравитационных вариаций с вертикальными смещениями:

$$\Delta g(t) = \gamma \cdot \Delta Z(t) + \xi,$$

где γ – вертикальный градиент $-3,08 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$; $\Delta Z(t)$ – изменения высоты, ξ – ошибка измерений.

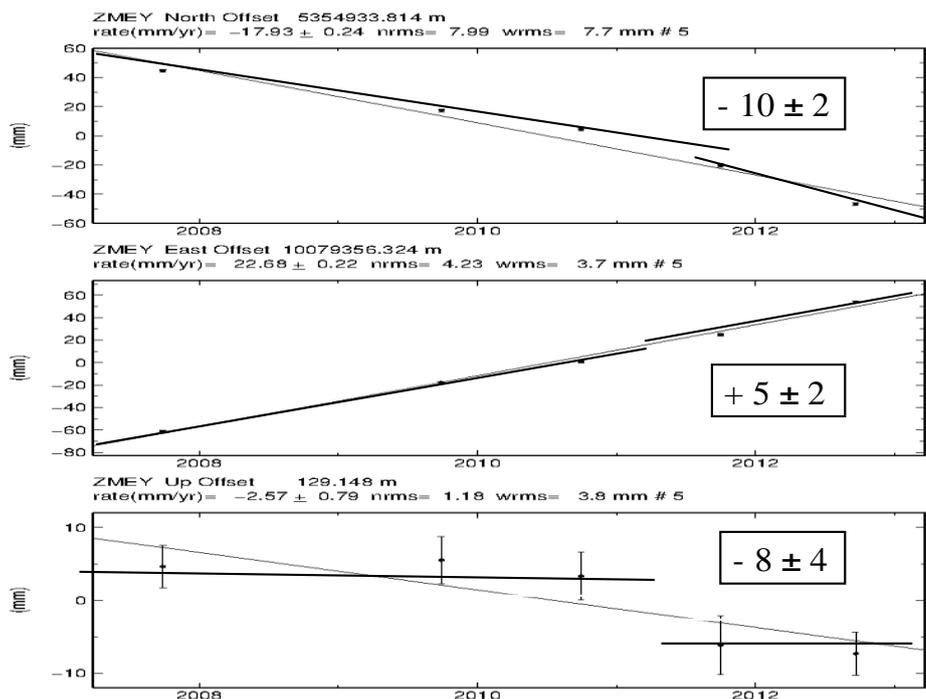


Рис. 2. Косейсмический скачок смещений на пункте ZMEY (сверху вниз: N, E, V)

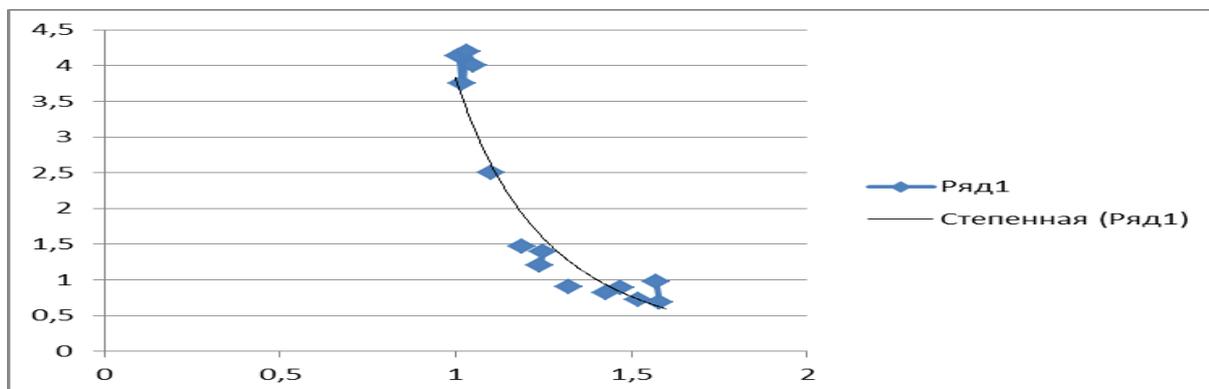


Рис. 3. Зависимость косейсмического горизонтального смещения (вертикальная ось в см) от расстояния до эпицентра в тысячах километрах (горизонтальная ось). Экспериментальные данные и квадратичная кривая

Косейсмический эффект при землетрясении 2011 года в изменениях силы тяжести соответствует опусканию на 15 мм. Севернее, на пункте ZMEY, зарегистрировано опускание 8 мм (рис. 4, вертикальные столбики). Чем вызван эффект, опусканием плиты или её деформированием? Для оценки вариации силы тяжести используем соотношение для бесконечного горизонтального слоя: $\Delta g = +2\pi k \rho \epsilon_{vol} H$, где k – константа, ρ – плотность, ϵ_{vol} – изменение объёмной деформации, H – мощность земной коры.

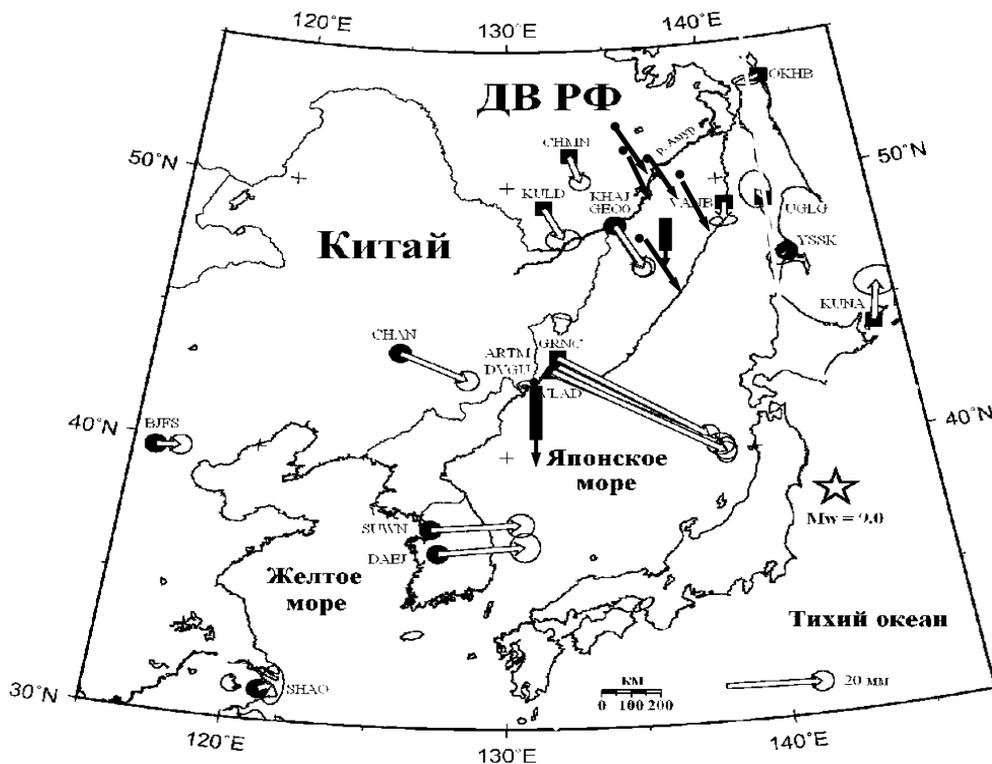


Рис. 4. Косейсмические смещения в дальней зоне в эпоху Японского землетрясения 2011 года. Стрелки – горизонтальные смещения (темные наши определения по северному профилю, пункт DUKI самый северный). Вертикальные стрелки (нижняя – мыс Шульца, верхняя короткая пункт ZMEY – опускания пунктов

Определим региональную косейсмическую деформацию для Приморья. Имеем оценку эффекта: $0.8 \cdot 10^{-8}$ для линии Восток-Запад: KULD-VANB (рис. 4). Для ортогональной линии Север-Юг: DUKI-ARTM: $1.7 \cdot 10^{-8}$ и для объёмной деформации $+1.7 \cdot 10^{-8}$. Гравитационный эффект при толщине литосферы (50 км, 100 км и 150 км) соответственно составит -0.1 микрогал, -0.2 микрогал и -0,3 микрогал (при $\rho = 3.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). Таким образом, эффект деформирования незначителен, а увеличение силы тяжести свидетельствует об опускании плиты.

В целом в дальней зоне наряду со значительной горизонтальной компонентой выделяется и вертикальная составляющая, вызванная косейсмическим опусканием земной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Охзоно Мако. Движения и деформации земной коры Дальнего Востока Российской Федерации, вызванные землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. и их влияние на результаты GNSS наблюдений // Геодезия и картография. - 2011. - № 8. - С. 35–43.

2. Timofeev V., Kulinich R., Valitov M., Stus Y., Kalish E., Ducarme B., Gornov P., Ardyukov D., Sizikov I., Timofeev A., G. Gil'manova, T. Kolpashikova and Z. Proshkina. Coseismic effects of the 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake measured at Far East Russia continental coast by gravity and GPS methods // International Journal of Geosciences. - 2013. - V. 4. - P. 362–370.

© В. Ю. Тимофеев, Е. Н. Калиш, М. Г. Валитов, Ю. Ф. Стусь, Р. Г. Кулинич, Д. Г. Ардюков, П. Ю. Горнов, А. В. Тимофеев, Д. А. Носов, И. С. Сизиков, 2015