

УДК 528.223
DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-31-44

Гравиметрические исследования на научном полигоне «Мыс Шульца»

В. Ю. Тимофеев^{1}, Д. Г. Ардюков¹, А. В. Тимофеев¹, М. Г. Валитов²,
И. С. Сизиков³, Д. А. Носов³, Ю. Ф. Стусь³*

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

² Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

³ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Гравиметрические исследования с помощью относительных и абсолютных гравиметров начаты на полигоне Тихоокеанского океанологического института Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН) «Мыс Шульца» в 2010 г. Одновременно на полигоне, расположенном на юге Приморья, начались геодезические измерения методами ГНСС (ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система) для определения координат и изучения смещений гравиметрических пунктов. Гравиметрические измерения используются для решения структурных и мониторинговых задач. Плановые и высотные геодезические измерения необходимы для корректной интерпретации гравиметрических результатов и получения редуцированных значений силы тяжести. Комплексные измерения с абсолютными и относительными гравиметрами использованы для тестирования метрологических характеристик относительных гравиметров типа SCINTREX и gPhone. В результате анализа приливных вариаций силы тяжести получены поправки в абсолютные данные. Проведение измерений на разновысотных пунктах с помощью абсолютных гравиметров типа «ГАБЛ-М» позволило провести редуцирование значений силы тяжести и сравнить экспериментальные и теоретические оценки. Результаты используются при структурных геологических исследованиях в Приморье. Второй задачей исследований было определение уровня временных вариаций силы тяжести, 3D-смещений земной поверхности и определение их природы. По данным измерений в период 2010–2020 гг. исследованы эффекты, связанные с Японским землетрясением 11.03.2011 магнитудой $M = 9,0$. На расстоянии 1 000 км от эпицентра величина постсейсмического опускания за период 2012–2020 гг. составила 22 мм, сила тяжести увеличилась на 6 микрогал (мкГал). По форме кривой затухания вертикальных смещений выбрана модель и получена оценка времени Максвелла ($T = 3$ года). В рамках двухслойной модели выполнено определение вязкости нижней части земной коры – астеносферы на окраине континента.

Ключевые слова: гравиметрические измерения, относительные и абсолютные гравиметры, космическая геодезия, юг Приморья, Дальний Восток России, редукция, вариации во времени силы тяжести, затухание смещений

Введение

Научный полигон «Мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН (п-ов Гамова, побережье Японского моря, юг Приморья) активно развивается с 1980-х гг. прошлого столетия (рис. 1, 2, 3). Здесь проводятся различные виды океанологических и геофизических измерений [1]. В исследованиях нами использован аппаратный комплекс, включающий цифровые относительные и абсолютные гравиметры, двухчастотные приемники космической геодезии. Комплекс позволяет определять координаты и значение силы тяжести на пунктах полигона, а также ис-

следовать вариации силы тяжести и 3D-смещений земной поверхности различной природы. Цель работы – показать возможности комплекса из современных высокоточных геодезических ГНСС-измерений миллиметровой точности и абсолютных гравиметрических определений микрогалльной точности при изучении структуры региона и мониторинга сейсмических процессов. Проведение многолетних измерений на полигоне (координаты 42,58°N, 131,16°E) позволило рассмотреть ряд задач. Первая относится к области структурных исследований. Это получение редуцированных значений силы тяжести в обла-

сти контакта «континент – море» на восточной границе тектонической плиты Евразия (см. рис. 2) и сравнение полученных результатов с существующими оценками.

Второй задачей было определение уровня временных вариаций силы тяжести, 3D-смещений земной поверхности и определение их природы.

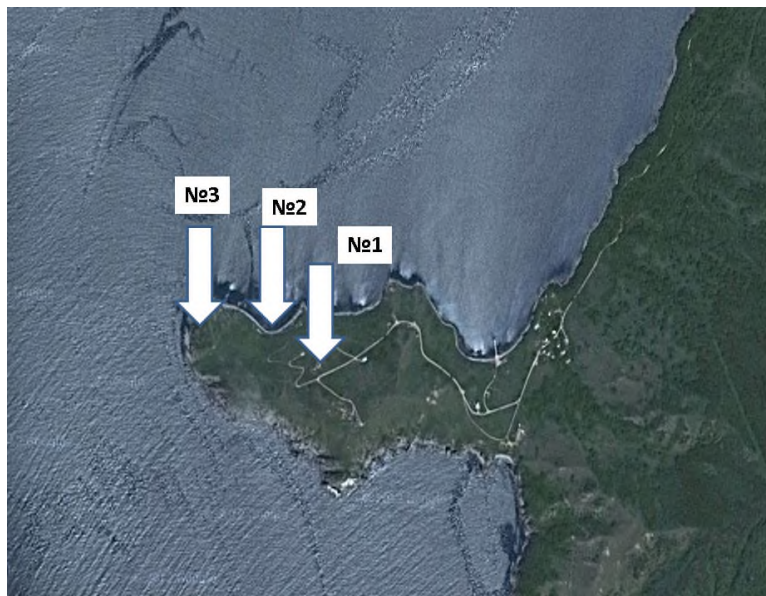


Рис. 1. Положение геодезических и гравиметрических пунктов на научном полигоне «Мыс Шульца» (п-ов Гамова, юг Приморья России)

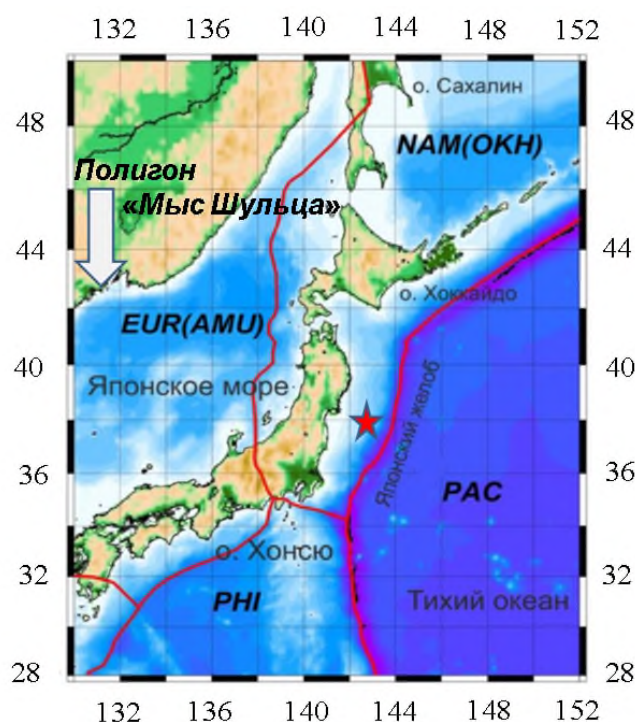


Рис. 2. Вариант положения границ литосферных плит в районе Приморья, Японских и Курильских островов по модели Morvel-56 [2].

Обозначения тектонических плит: EUR – Евразийская, NAM – Северо-Американская, PAC – Тихоокеанская, PHI – Филиппинская, ОКН – Охотоморская. На юге Приморья стрелкой показано положение полигона «Мыс Шульца», звездочкой обозначен эпицентр Японского землетрясения 11.03.2011, $M = 9,0$ [3]

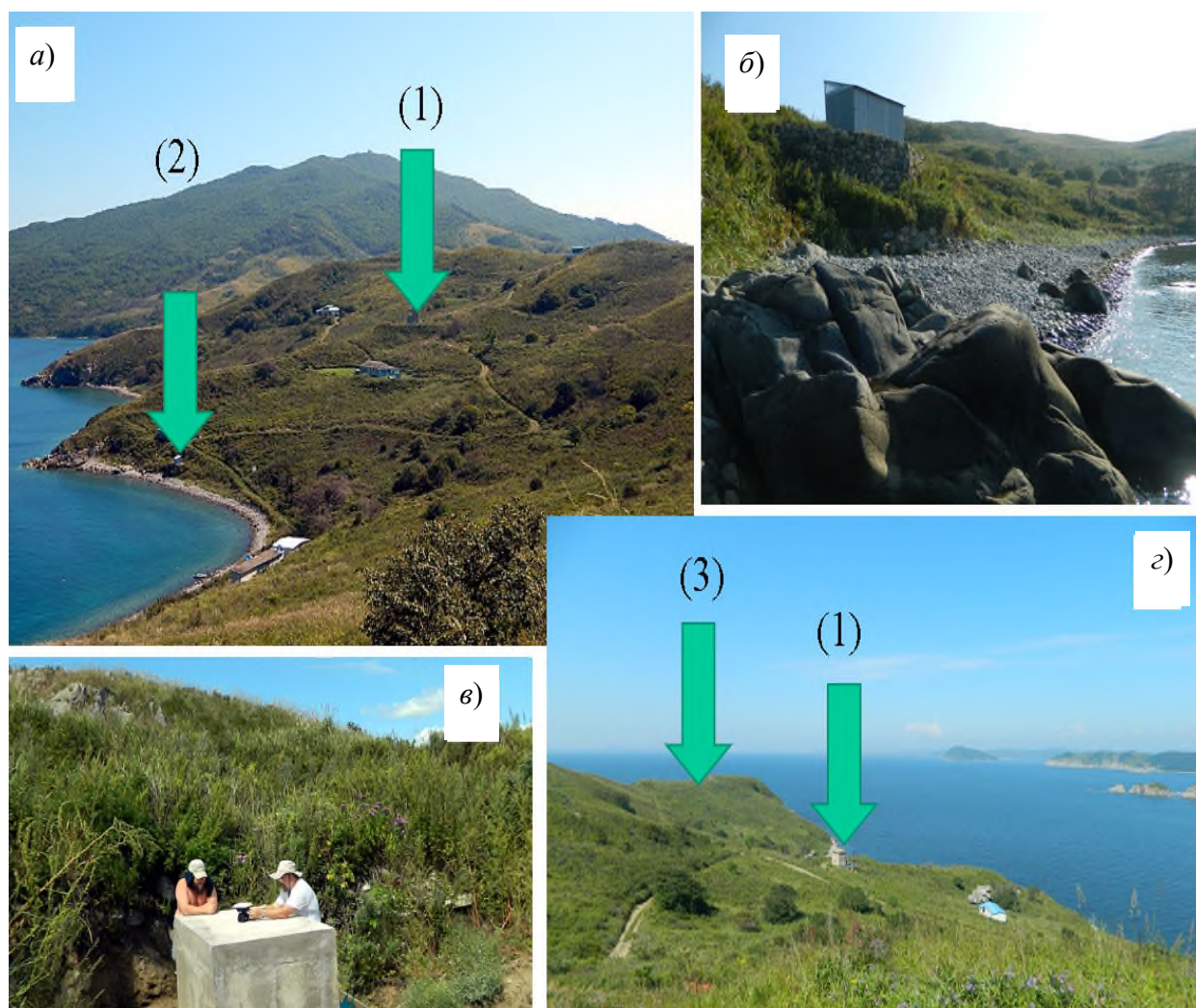


Рис. 3. Положение гравиметрических пунктов:

а), г) пункта № 1 на горе; *а), б)* пункта № 2 на берегу; *в), г)* пункта № 3 на специальном постаменте, оборудованном на крайней западной оконечности научного полигона «Мыс Шульца»

Для выполнения планов исследований были заложены пункты для геодезических и гравиметрических измерений. Начиная с 2010 г. гравиметрические исследования проводились на постаментах, оборудованных в подземном бункере, ранее используемом военными (см. рис. 1 и 3). Здесь выполнялись непрерывные наблюдения приливных вариаций силы тяжести и ежегодные измерения абсолютным гравиметром. Второй пункт гравиметрических наблюдений № 2 расположен на берегу Японского моря на переоборудованном капонири. Здесь выполнялись периодические измерения абсолютным гравиметром, начиная с 2012 г. Гравиметрический пункт № 3 оборудован на западной оконеч-

ности мыса Шульца выше пункта № 1 (см. рис. 1 и 3).

Практически рядом, в нескольких метрах от гравиметрических пунктов, нами были заложены скальные реперы для проведения геодезических измерений комплектом ГНСС-приемников с жесткой центровкой антенны [1]. Геодезические реперы на полигоне закладывались нами для определения высоты и координат пунктов, а также для измерения вариаций 3D-смещений пунктов. Пример определения высоты пункта спутниковой аппаратурой в результате 120 ч измерений с привязкой к постоянным станциям мировой сети приведен в табл. 1.

Данные, полученные при геодезических измерениях координат и вариаций 3D-смещений

пунктов, использованы при интерпретации гравиметрических данных для определения редуционных поправок и сравнения со значениями в различных системах координат и высот; многолетние ежегодные данные анализировались при оценке параметров затухания вертикальных постсейсмических смещений в дальней зоне катастрофического землетрясения.

Методы измерений и анализа

Исследование приливных вариаций силы тяжести с помощью относительного цифрового гравиметра SCINTREX CG5 40301 начаты летом 2010 г. Приливный анализ, выполненный на сериях данных, полученных в 2010 и в 2011 гг., выявил отклонения по сериям в амплитудном факторе волны M2 на 1,7 %, волны O1 на 2,1 % и в фазовом сдвиге на 0,5 %, что на порядок превышает ошибку измерений [1]. Результаты по амплитудам и фазам оказались крайне неустойчивы во времени, что свидетельствует о несоответствии метрологических характеристик данного прибора паспортным данным. Поэтому в 2012 г. для проведения гравиметрических измерений приобретен относительный цифровой гравиметр gPhone 111. Гравиметр имеет 18 цифровых каналов, но при приливном анализе пришлось использовать только первый и восьмой, а именно – оригинальный сигнал с маятника и показания датчика атмосферного давления (рис. 4).

Таблица 1

Результаты определения высоты пункта № 1 в эпоху 2012 г. по ежесуточным данным, полученным ГНСС-аппаратурой типа TRIMBLE 4700

Год, месяц, число	Часы, минуты, секунды	Высота, м
2012.08.31	11.59.00	78,615 31
2012.09.01	11.59.00	78,603 08
2012.09.02	11.59.00	78,611 61
2012.09.03	11.59.00	78,601 81
2012.09.04	11.59.00	78,609 68
Среднее значение с ошибкой		78,608 30 ± 0,002 60

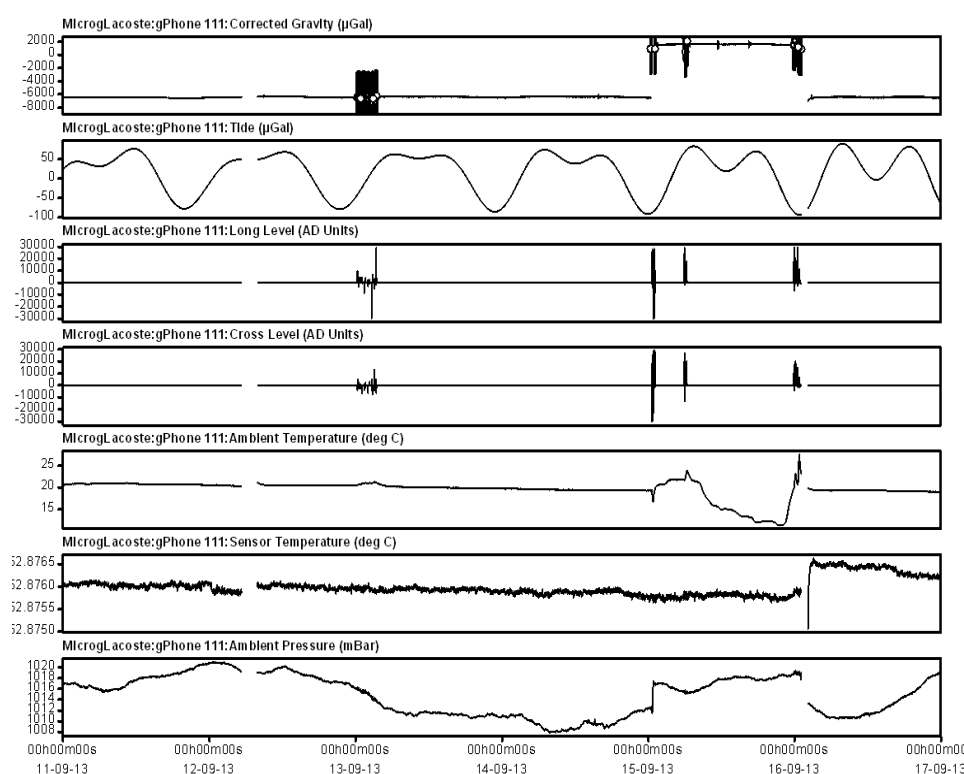


Рис. 4. Пример цифровой записи гравиметра gPhone 111 по измерениям на первом и втором гравиметрических пунктах (см. рис. 1, 3).

Сверху вниз: канал № 2 – запись с маятника гравиметра с учетом показаний уровней; канал № 3 – теоретический прилив; каналы № 4 и 5 – показания уровней; канал № 6 и 7 – внешняя и внутренняя температура; канал № 8 – атмосферное давление. Запись получена в период с 11 по 17 сентября 2013 г.

Цифровые данные, полученные с датчиков уровней, оказались фиктивными, так как датчики в приборе установлены так, что не отражают положение маятника гравиметра, а поправки за уровни только искажают приливные вариации силы тяжести, регистрируемые маятником прибора. Полученные приливные параметры использованы при оценке приливных деформаций Земли с учетом океанической поправки [4, 5] и при обработке результатов абсолютных измерений.

Абсолютные гравиметрические измерения начаты осенью 2010 г. Для исключения сезонных факторов ежегодные измерения гравиметром «ГАБЛ-М» проводились в сентябре. Выбирались периоды с отсутствием тайфунов и циклонов, хотя последствия сильных ливней могли исказить полученные данные.

Для определения значений силы тяжести на отдельных пунктах полигона и получения величины вариаций во времени использован абсолютный гравиметр «ГАБЛ-М» с эффективной высотой $H_{eff} = 1,032$ м при среднеквадратичной ошибке измерений, изменяющейся в различных сериях от 0,5 до 2,8 мкГал. При обработке данных использованы все поправки, рекомендованные при сверке абсолютных приборов в международных центрах

[6–8]. В 2019 г. в измерениях был задействован гравиметр GABL-PM-4 с эффективной высотой $H_{eff} = 0,746$ м, при этом среднеквадратичная ошибка при измерениях на пункте № 1 составила 1,2 мкГал, на пункте № 2 – 5,8 мкГал и на пункте № 3 – 4,1 мкГал (см. рис. 1).

Для точных плановых и высотных измерений использована ГНСС-аппаратура – двухчастотный приемник TRIMBLE 4700. Такие наблюдения выполнялись на крыше первого гравиметрического пункта (см. рис. 1), расположенного на горе (см. табл. 1). С 2012 г. измерения проводятся на пункте № 2, расположенном на берегу моря (как показано на рис. 1, 3, 5). Размещение пунктов на разной высоте (разность высот гравиметрических пунктов составляет 38,950 м) позволила использовать их для поверки метрологических характеристик относительного гравиметра gPhone 111.

В 2013 г. на полигоне были проведены комплексные гравиметрические измерения (отображенные на рис. 4, 6). В результате разность значений силы тяжести на пунктах № 1 и 2 составила по измерениям с относительным гравиметром gPhone 111 $7\,917,7 \pm 17,3$ мкГал по абсолютным определениям с гравиметром «ГАБЛ-М»: $7\,925,1 \pm 2,0$ мкГал.



Рис. 5. Положение антенны приемника ГНСС на геодезическом репере при измерениях на гравиметрическом пункте № 2 (см. рис. 3, б)

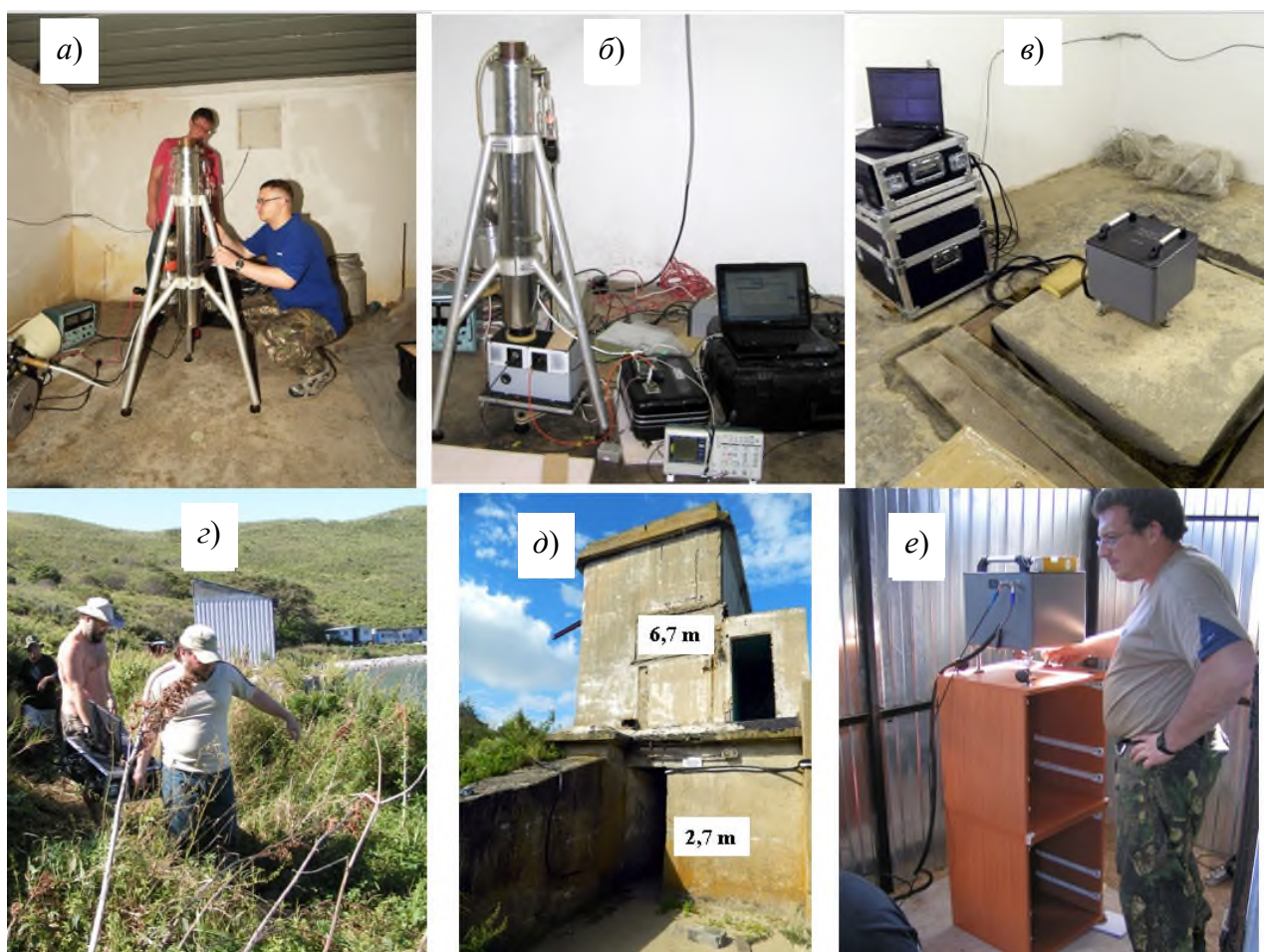


Рис. 6. Комплексные гравиметрические измерения:

а), б) гравиметр «ГАБЛ-М» на пункте № 1; в) гравиметр gPhone 111 на пункте № 1; г) транспортировка гравиметра с пункта на пункт; д) пункт № 1 – антенна приемника ГНСС на крыше здания и гравиметрический пункт в подвале; е) определение вертикального градиента с гравиметром gPhone 111 на пункте № 2

Полученные значения различаются на 0,04 % от среднего значения разности 7 921,4. Исследования показали соответствие полученных метрологических параметров гравиметра gPhone 111 паспортным характеристикам прибора.

Данные о приливных вариациях силы тяжести, полученные с помощью гравиметра gPhone 111, использованы для определения приливных поправок в абсолютные определения [4, 5]. Для абсолютного гравиметра типа «ГАБЛ-М» получено среднее значение разности по многолетним определениям $7\,920,7 \pm 6,1$ (табл. 2), для абсолютного гравиметра типа GABL-PM-4 значение составило $7\,932,5 \pm 7,0$. Полученные на разных

типах приборов величины оказались в пределах ошибки измерений.

Таблица 2

Разность значений силы тяжести на пунктах № 1 и 2 для разных типов абсолютных гравиметров в микрогалах

Год измерений	Разность значений силы тяжести, мкГал
2012	7 907,2 («ГАБЛ-М»)
2013	7 925,1 («ГАБЛ-М»)
2015	7 918,3 («ГАБЛ-М»)
2016	7 932,3 («ГАБЛ-М»)
Среднее с ошибкой	$7\,920,7 \pm 6,1$
2019	$7\,932,5 \pm 7,0$ (GABL-PM-4)

Одновременно было выполнено измерение величины вертикального градиента силы тяжести на постаментах, расположенных на горе и на берегу моря (см. рис. 1, 3, 4). Определения на пункте № 1 в подземном бункере показали значение градиента $290,2 \pm 0,3$ мкГал/м. На берегу моря на пункте № 2 получено значение $307,6 \pm 6,3$ мкГал/м. Ошибка связана с высокими температурными градиентами на пункте № 2 (см. рис. 4, канал б). Измерения на пункте № 2 сопровождалась автоматической блокировкой маятника прибора при резком повышении температуры в металлической коробке пункта (см. рис. 1, 4 и рис. 6, з, е). При этом вертикальный градиент на пункте № 2 оказался близок к нормальному значению $308,6$ мкГал/м. Для пункта № 1, расположенного на горе в подвале, вертикальный градиент оказался на 6 % ниже нормального. Величины вертикального градиента на пунктах использованы для введения поправки в данные измерений, выполненных абсолютными гравиметрами разных типов (см. табл. 2).

Для получения миллиметровой точности измерений продолжительность геодезических ГНСС-наблюдений с приемником TRIMBLE 4700 составляла трое суток и более на отдельном пункте (табл. 3).

Таблица 3

Разность высот гравиметрических пунктов № 1 и 2 в метрах по измерениям ГНСС-приемником

Год измерений	Разность высот, м
2012	38,945 52
2013	38,966 77
2014	38,947 96
2015	38,949 96
2016	38,950 4
2017	38,950 39
2018	38,949 10
2019	38,949 29
2020	38,948 14
Среднее значение с ошибкой	$38,950 84 \pm 0,002 1$

В большинстве случаев использовались одновременные измерения комплектом из нескольких приемников одного типа на двух и более пунктах. Для обработки данных при-

менялась программа GAMIT-GLOBK с привлечением данных постоянных GPS-станций сети IGS (в системе координат ITRF2008). Разность высот пунктов определялась по данным многолетних одновременных наблюдений на пунктах № 1 и 2 (см. табл. 3).

Результаты наблюдений и интерпретация

При изучении гравитационного поля его разделяют на нормальную и аномальную части. Аномальная часть – это разность нормального значения и наблюдаемой величины на физической поверхности. Нормальное значение задается нормальной формулой на поверхности эллипсоида, а для получения аномалии ускорения силы тяжести необходимо перенести наблюдаемое значение на эллипсоид. Рассмотрим задачу редукции значения силы тяжести, используя экспериментальные данные. Для этой цели было выполнено определение плотности горной породы, слагающей полигон. По нашим определениям для гранодиоритов, отобранных на скальных обнажениях, представленных на полигоне «Мыс Шульца», плотность составила $2,73$ г/см³. Сравнение с данными по другим регионам [9] показывает типичность полученных значений для гранодиоритов. Рассмотрим известное соотношение для редукции Буге, включающей поправку за свободный воздух и промежуточный слой [10]. Учитывая плотность $2,73$ г/см³, разность высот $38,95$ и нормальный градиент, получаем

$$\Delta g = \frac{2g}{rH} - 2\pi \cdot G \cdot \rho \cdot H = 308,6 \cdot H - 114 \cdot H = 194,6 \cdot H = 7\,579,6 \text{ мкГал}, \quad (1)$$

где H – разность высот, т. е. мощность слоя; r – радиус Земли; g – нормальное значение силы тяжести; G – гравитационная постоянная; ρ – плотность слоя.

Далее вводили топографическую поправку за рельеф (см. рис. 1, 3). На полигоне для пунктов № 1 и 2, исходя из форм рельефа, выбрана для вычислений модель «наклонная плоскость». Из отношения высоты H к горизонтальному расстоянию R между пунктами определен угол наклона плоскости I [10]. В нашем

случае при $I = 17^\circ$, $R = 133$ м, $\rho = 2,73$ г/см³ получили

$$\begin{aligned} \delta g &= \pi \cdot G \cdot \rho \cdot R \cdot (1 - \cos \Pi) = \\ &= 57,23 \cdot R \cdot (0,0437) = 332,6 \text{ мкГал}. \end{aligned} \quad (2)$$

Аномалия Буге и поправка за рельеф (1) и (2) в сумме дали эффект величиной 7 912,2 мкГал. Полученное значение в пределах ошибок хорошо соответствует данным измерений как относительным гравиметром gPhone 111 ($7\,917,7 \pm 17,3$ мкГал), так и абсолютным гравиметром «ГАБЛ» ($7\,920,7 \pm 6,1$ мкГал). Коэффициент пересчета за высоту пункта с учетом редукции Буге и топографической поправки составил 203,4 мкГал/м.

Измерения на пункте № 3 впервые проводились в 2019 г. с использованием гравиметра GABL-PM-4. Высота пункта № 3 относительно пункта № 2 на берегу составляет 50,39 м. Используя те же параметры для редукции Буге (1), получаем следующее значение:

$$\Delta g = 194,6 \cdot H = 9\,808 \text{ мкГал}. \quad (3)$$

Пункт № 3 расположен на западной оконечности мыса Шульца с очень крутым рельефом, поэтому для вычисления топографической поправки использована модель «конус» [10]. Угол $I = 49^\circ$, в этом случае это угол наклона образующей конуса, H – высота конуса. Разность высот пункта № 2 и пункта № 3 составляет 50,39 м

$$\begin{aligned} \Delta g_{T2} &= 2\pi \cdot G \cdot \rho \cdot H \cdot (1 - \sin \Pi) = \\ &= 114,46 \cdot H \cdot (0,2446) = 1\,411 \text{ мкГал}. \end{aligned} \quad (4)$$

Аномалия Буге и поправка за рельеф (3) и (4) в сумме дают эффект 11 219 мкГал. Полученное значение в пределах ошибок хорошо соответствует результату измерений с абсолютным гравиметром GABL-PM-4, который составил 11 230 мкГал. Ошибка измерений на пункте № 2 составила 5,8 мкГал и на пункте № 3 – 4,1 мкГал, а суммарная – 10 мкГал. Таким образом, результаты расчетов и данные измерений в пределах ошибок совпали.

По результатам измерений на пунктах № 1 и 2 в 2019 г., выполненных с помощью гравиметра GABL-PM-4, получена разность в зна-

чении силы тяжести 7 932 мкГал, при суммарной ошибке 7 мкГал (см. табл. 1).

Полученные значения можно использовать для пересчета значений поля силы тяжести на нулевую высоту на полигоне. Так, для пункта № 2 превышение относительно уровня моря (геоида) на нулевом приливе составило 4,7 м. Используя значение нормального поля, вычисленного по формуле Гельмерта (1901–1909 гг.) [10], и экспериментальные определения с абсолютным гравиметром с учетом высоты относительно уровня моря (геоида) и соотношения 203,4 мкГал/м, получаем величину аномалии Буге +33 577 мкГал, для аномалии в свободном воздухе (Фая) +34 068 мкГал. Согласно данным, приведенным на «Карте аномалий Буге» масштаба 1 : 2 500 000 для Приморья, аномалия составляет около 45 мГал [11]. Разность с нашими определениями можно объяснить использованием разных систем высот. Используя [12, 13], получаем оценку высоты квазигеоида для нашего района 53 м, с ошибкой 1 м. То есть изменение, связанное с высотой квазигеоида в 11 мГал, в сумме составляет 44,6 мГал и приблизительно соответствует вышеупомянутой «Карте аномалий Буге». Значение силы тяжести в редукции Буге используется для структурных построений в геофизике. Известно, что рельеф нижней границы земной коры отражается в распределении и интенсивности региональных аномалий силы тяжести. Известна осредненная для Земли связь мощности земной коры (M) и значений аномалий Буге (Δg)

$$M = M_0 + k \cdot \Delta g, \quad (5)$$

где M_0 – толщина земной коры в областях, где высота $H = 0$, для континентальной коры M_0 меняется от 35,0 до 41,4 км; изменения коэффициента k для континентальной коры составляют обычно от 0,033 до 0,102 км/мГал [14].

Согласно общепринятым представлениям, для поля аномалий Буге характерны большие, порядка сотен миллигал, положительные значения на океанах. На платформах обычно наблюдается спокойное мозаичное поле с небольшими максимумами и минимумами, в диапазоне нескольких десятков миллигал [14].

Гравитационному полю аномалий в свободном воздухе в основном соответствует мозаичное, плавно изменяющееся в пределах ± 50 мГал поле на океанах с возрастающими положительными аномалиями над островами и островными дугами и отрицательными, порядка 100 мГал, над глубоководными впадинами [14]. Полученные значения силы тяжести в редукции Буге и в редукции Фая составляют +34 мГал. Величина аномалий при пересчете согласно соотношению (5) приводит к слабым, в пределах 1–3 км, отклонениям от мощности земной коры на континентах.

Вариации силы тяжести и высоты во времени

Результаты многолетних наблюдений позволяют рассмотреть вариации значения силы

тяжести и высоты во времени. Блокировка смещений на границе континентальной и океанической плит [2] приводит к накоплению энергии деформации, порождает сильные землетрясения, быстрые косейсмические подвижки и медленные постсейсмические смещения земной поверхности (см. рис. 2). Медленные постсейсмические движения в рамках двухслойной модели земной коры (упругий и вязкий слой) обусловлены вязким прилипанием и крипом на границе слоев [15, 16]. Рассмотрим процесс релаксации постсейсмических смещений после катастрофического Японского землетрясения 11.03.2011 магнитудой $M = 9$ (см. рис. 2) на расстоянии 1 000 км от эпицентра.

Постсейсмическое многолетнее вертикальное смещение пункта GORA (гравиметрический пункт № 1) показано на рис. 7.

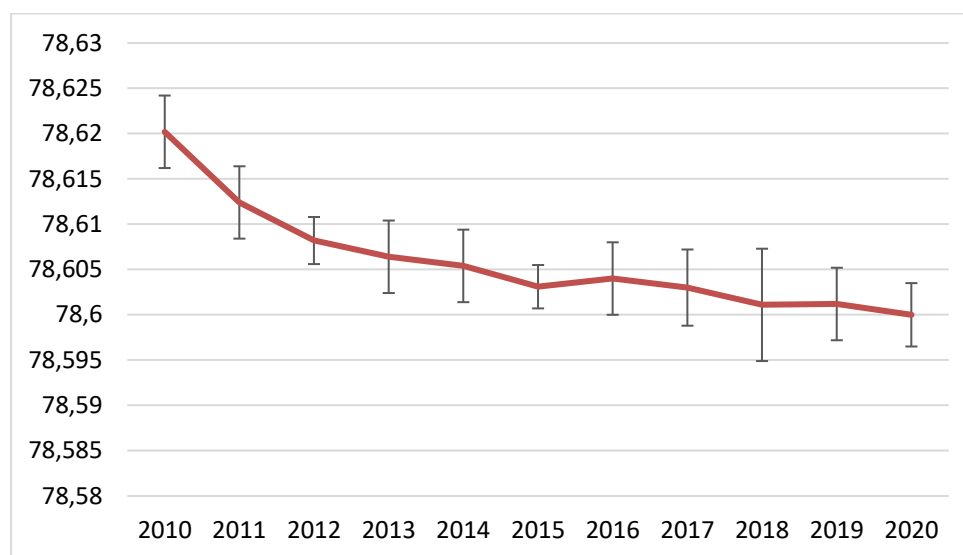


Рис. 7. Постсейсмическое вертикальное смещение пункта GORA в метрах, с ошибкой, за период 2010–2020 гг.

График затухания смещений построен по данным, полученным ежегодно в сентябре, и отражает процесс постсейсмической релаксации после землетрясения в Японии [3]. Постсейсмические эффекты обычно регистрируются в эпохи сильных землетрясений в разных частях планеты [17–20]. Пример определения высоты в отдельную эпоху приведен в табл. 1.

Продолжительность процесса затухания смещений в реологической модели типа «тело

Максвелла» характеризуется параметром – временем релаксации T , которое связано следующим соотношением с вязкостью η и модулем сдвига μ нижнего слоя коры или астеносферы [16]

$$T = \frac{\alpha \cdot \eta}{2\mu}, \quad (6)$$

где параметр α изменяется в пределах: $1 < \alpha < 10$ [16].

Модель вязко-упругой релаксации смещений наиболее реальна для описания постсейсмического эффекта дальней зоны Японского землетрясения (11.03.2011, $M = 9$). В наиболее простой форме время релаксации T (6) можно описать следующим образом:

$$T = \frac{\eta}{2\mu}, \quad (7)$$

где μ – упругий модуль сдвига; η – вязкость нижнего слоя.

Соотношение для вязкости нижнего слоя из соотношения (7) записывается в виде

$$\eta = 2 \cdot T \cdot \mu \quad \eta = 2 \cdot T \cdot \mu. \quad (8)$$

Модуль сдвига для нижнего слоя оценивается в диапазоне 30–55 ГПа. Изменения силы тяжести, полученные по данным измерений с гравиметром «ГАБЛ-М», результаты измерений вертикальных движений, пересчитанные в вариации силы тяжести и модельные кривые затухания, построенные при временах релаксации $T = 3$ года, приведены на рис. 8.

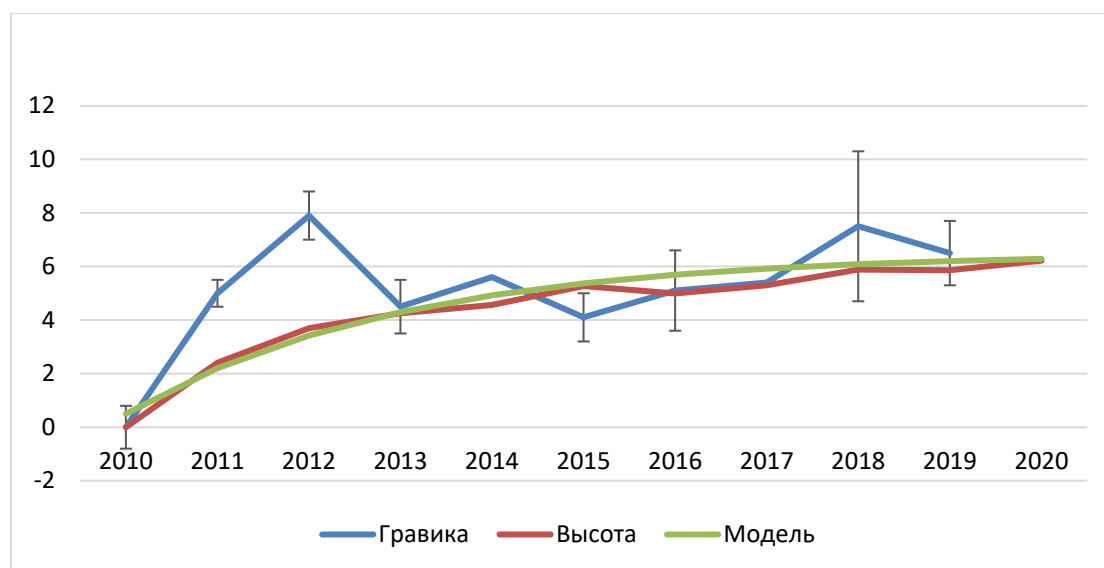


Рис. 8. Изменение величины силы тяжести на пункте GORA в микрогалах с ошибкой наблюдений; опускание пункта GORA, пересчитанное в значения силы тяжести по формуле с нормальным вертикальным градиентом; модельная кривая затухания смещений.

Модельная кривая затухания построена с использованием соотношения $w = A \cdot \exp(-t/T)$ при времени релаксации Максвелла $T = 3$ года. Горизонтальная шкала – время, годы. Вертикальная шкала – величина изменений силы тяжести в микрогалах

В итоге из анализа кривых затухания смещений и вариаций силы тяжести, полученных на полигоне в дальней зоне Японского землетрясения, в рамках двухслойной модели (8), получены следующие значения вязкости нижнего слоя: $5,7 \cdot 10^{18} - 1,4 \cdot 10^{19}$ Па·с.

Заключение и выводы

Экспериментальные работы с гравиметрами и геодезическими ГНСС-приемниками на полигоне ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца» (п-ов Гамова, побережье Японского моря, Приморский край, южнее г. Владивостока на

200 км) выполнялись с 2010 г. – на специально оборудованном пункте. Наблюдения с 2012 г. начаты на втором пункте, а с 2019 г. – на третьем. Измерения, проведенные на разновысотных пунктах абсолютным гравиметром «ГАБЛ-М» и относительным гравиметром gPhone 111, использованы для тестирования относительного гравиметра. На первом и втором гравиметрических пунктах проведено определение вертикального градиента. На пункте № 1 в подземном бункере на глубине около 3 м получено значение $-290,2 \pm 0,3$ мкГал/м. Для второго пункта на берегу моря значение вертикального градиента соответствует его нор-

мальной величине. Используя данные измерений методом спутниковой геодезии, получены значения координат и высот пунктов. По данным высотных и гравиметрических измерений выполнены экспериментальные определения параметров редукции – Буге, Фая и топографической поправки. Для пунктов полигона получен коэффициент для перехода на нормальный эллипсоид: 204 мкГал/м. Проведены первые измерения на пункте № 3, расположенном на крайней западной точке мыса Шульца. Топографическая поправка для пунктов № 1 и 2 составила 4,2 %, для пункта № 3 12,6 %. Значение гравитационного поля, пересчитанного на уровень моря в редукции Буге и Фая, составило около 34 мГал, что типично для окраины континента [14]. В период 2011–2020 гг. в дальней зоне Японского землетрясения (11.03.2011, $M = 9$) наблюдаются

косейсмические и постсейсмические смещения и изменения силы тяжести. В момент землетрясения косейсмические горизонтальные смещения в 1 000 км от эпицентра достигали 40 мм [21].

Постсейсмическое опускание за период 2012–2020 гг. составило 22 мм, значения силы тяжести увеличилось на 6 мкГал. Для описания процесса смещений предложена двухслойная вязко-упругая модель. Многолетнее опускание пункта № 1 описывается кривыми релаксации с временем затухания по Максвеллу $T = 3$ года, что дает оценку вязкости нижней коры или астеносферы в пределах $5,7 \cdot 10^{18}$ – $1,4 \cdot 10^{19}$ Па·с. Полученные значения в целом соответствуют оценкам, полученным для эпох крупнейших землетрясений Дальневосточного региона [22, 23].

Исследования выполнены в рамках проекта НИР номер FWZZ-2022-0019 (0266-2022-0019) Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Timofeev V., Kulinich R., Valitov M., Stus Y., Kalish E., Ducarme B., Gornov P., Ardyukov D., Sizikov I., Timofeev A., Gil'manova G., Kolpashikova T., Proshkina Z. 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. – Vol. 4. – P. 362–370. – DOI 10.4236/ijg.2012.
2. DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F. Geologically recent plate motions // *Geophysical Journal International*. – 2010. – Vol. 181. – P. 1–80.
3. Lay T., Kanamori H. Insights from the Great 2011 Japan Earthquake // *Physics Today*. – 2011. – Vol. 64, No. 12. – P. 33. – DOI 10.1063/PT.3.1361.
4. Тимофеев В. Ю., Валитов М. Г., Дюкарм Б., Ардюков Д. Г., Наумов С. Б., Тимофеев А. В., Кулинич Р. Г., Колпашикова Т. Н., Прошкина З. Н., Сизиков И. С., Носов Д. А. Приливные эффекты по гравиметрическим и уровнемерным наблюдениям, океанические приливные модели // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 36–47.
5. Тимофеев В. Ю., Валитов М. Г., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В., Дюкарм Б., Кулинич Р. Г., Колпашикова Т. Н., Прошкина З. Н., Бойко Е. В., Наумов С. Б. Океанические приливные модели и гравиметрические приливные наблюдения // *Океанология*. – 2020. – Т. 60, № 1. – С. 37–48. – DOI 10.31857/S0030157420010220.
6. Arnautov G. P. Results of international metrological comparison of absolute laser ballistic gravimeters // *Avtometria*. – 2005. – Vol. 41 (1). – P. 126–136.
7. Riccardi U., Rosat S., Hinderer J. Comparison of the Micro-g LaCoste gPhone-054 spring gravimeter and the GWR-C026 superconducting gravimeter in Strasbourg (France) using a 300-day time series // *Metrologia*. – 2011. – Vol. 48. – P. 28–39. – DOI 10.1088/0026-1394/48/1/003.
8. Hinderer J., Crossley D. Two Decades of High Precision Gravimetry // *Newsletter*. – 2006. – Vol. 17. – P. 2–12.
9. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика // под ред. Н. Б. Дортман. – М. : Недра, 1984. – 455 с.
10. Миронов В. С. Курс гравиразведки. – Л. : Недра, Ленинградское отделение, 1972. – 511 с.
11. Gravity map of North-East part of U.S.S.R. and boarding seas, in reduction Bouguer (1 : 2 500 000 scale). – Ministry of geology U.S.S.R., All-Union scientific researches Institute geophysical methods of reconnaissance of the U.S.S.R., 1968.

12. Остач О. М. Астрономо-геодезическое нивелирование: ретроспективный взгляд // Геодезия и картография. – 1994. – № 3. – С. 28–33.
13. Карта высот квазигеоида над эллипсоидом Красовского Масштаб 1 : 11 700 000. Составлена по результатам астрономо-гравиметрического нивелирования с учетом общего уравнивания астрономо-геодезической сети страны. – ЦНИИГАиК и Роскартография, 1996.
14. Грушинский Н. П. Основы гравиметрии. – М. : Наука, 1983. – 352 с.
15. Elsasser W. M. Two-Layer Model of Upper-Mantle Circulation // Journal of Geophysical Research. – 1971. – Vol. 76, No. 20. – P. 4744–4753.
16. Nur A., Mavko G. Postseismic viscoelastic rebound // Science. – 1974. – No. 183. – P. 204–206.
17. Ozawa S., Nishimura T., Suito H., Kobayashi T., Tobita M., Imakiire T. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude 9 Tohoku-Oki earthquake // Nature. – 2011. – Vol. 475. – P. 373–376.
18. Pollitz F. F. VISCO1D. Version 3. Tutorial [Electronic resource]. – Reston : USGS, 2006. – 36 p. – Mode of access: <http://earthquake.usgs.gov/research/software/VISCO1D/manual.pdf>.
19. Segall P. Integrating geologic and geodetic estimates of slip rate on the San Andreas fault system [Electronic resource] // International Geology Review. – 2002. – Vol. 44 (1). – P. 62–82. – Mode of access: <https://doi.org/10.2747/0020-6814.44.1.62>.
20. Freed A. M., Burgmann R., Calais E., Freymueller J., Hreinsdottir S. Implications of deformation following the 2002 Denali, Alaska, earthquake for postseismic relaxation processes and lithospheric rheology // Journal of Geophysical Research. – 2006. – Vol. 111. – B01401. – DOI 10.1029/2005JB003894.
21. 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.
22. 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 // Congress IUGG, 2019. – G06p-311.
23. Владимирова И. С., Стеблов Г. М., Фролов Д. И. Исследование вязкоупругих деформаций после Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. // Физика Земли. – 2011. – № 11. – С. 75–80.

Об авторах

Владимир Юрьевич Тимофеев – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник.
Дмитрий Геннадьевич Ардюков – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

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

Максим Георгиевич Валитов – кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией.

Игорь Сергеевич Сизиков – инженер-конструктор, инженер.

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

Юрий Фёдорович Стусь – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Получено 05.03.2022

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, М. Г. Валитов,
И. С. Сизиков, Д. А. Носов, Ю. Ф. Стусь, 2022

Gravity observation at Shults cape polygon

V. Ju. Timofeev¹, D. G. Ardyukov¹, A. V. Timofeev¹, M. G. Valitov²,
I. S. Sizikov³, D. A. Nosov³, Yu. F. Stus³*

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

² V. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

³ Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Abstract. Gravity measurements with different kind of absolute gravimeters and spring gravimeters were started at the Marine Experimental Observatory Shults Cape of Il'ichev Oceanological Institute, Far East Branch of Russian Academy of Sciences from 2010 year. Simultaneously, on the polygone, located in the

South of Primorie, started the geodetic measurements by GNSS methods for determination of the coordinates and study of gravimetric points' displacements. Gravimetric measurements are used to solve structural and monitoring tasks. Planned and high-altitude geodetic measurements are necessary for the correct interpretation of gravimetric results and obtaining reduced gravity values. Complex measurements with absolute and relative gravimeters are used to test the metrological characteristics of relative gravimeters such as SCINTREX and GPhone. As a result of the analysis of tidal variations of gravity, corrections to the absolute data were obtained. Carrying out measurements at different altitudes using absolute gravimeters of the GABLM-M type made it possible to reduce the values of gravity and compare experimental and theoretical estimates. The results are used in structural geological studies in Primorie. The second task of the research was to determine the level of time variations of gravity, 3D displacements of the earth's surface and determine their nature. According to measurements in the period 2010–2020, the effects associated with the Japanese earthquake of 11.03.2011 with a magnitude of $M = 9,0$ were investigated. At a distance of 1000 km from the epicenter, the magnitude of post-seismic subsidence for the period 2012–2020 was 22 m, gravity increased by 6 microgal. According to the shape of the attenuation curve of vertical displacements, a model was selected and an estimate of Maxwell's time ($T = 3$ years) was obtained. Within the framework of a two-layer model, the viscosity of the earth's crust lower part – the asthenosphere on the edge of the continent – was determined.

Keywords: gravimetric measurements, relative and absolute gravimeters, space geodesy, the south of Primorie, the Far East of Russia, reduction, variations in time of gravity, attenuation of displacements

REFERENCES

1. Timofeev, V., Kulinich, R., Valitov, M., Stus, Y., Kalish, E., Ducarme, B., Gornov, P., Ardyukov, D., Sizikov, I., Timofeev, A., Gil'manova, G., Kolpashikova, T., & Proshkina, Z. (2013). 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*, 4, 362–370. doi: 10.4236/ijg.2012.
2. De Mets, C., Gordon, R. G., & Argus, D. F. (2010). Geologically recent plate motions. *Geophysical Journal International*, 181, 1–80.
3. Lay, T., & Kanamori, H. (2011). Insights from the Great 2011 Japan Earthquake. *Physics Today*, 64(12), p. 33. doi:10.1063/PT.3.1361.
4. Timofeev, V. Y., Valitov, M. G., Ducarme, B., Ardyukov, D. G., Naymov, S. B., Timofeev, A. V., Kulinich, R., Kolpashikova, T. N., Proshkina, Z. N., Sizikov, I. S., & Nosov D. A. (2016). Tidal effects by gravity and water leveling observation, ocean tidsals models. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1 (33), 36–47 [in Russian].
5. Timofeev, V. Y., Valitov, M. G., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., Ducarme, B., Kulinich, R. G., Kolpashikova, T. N., Proshkina, Z. N., & Boyko, E. V. (2020). Ocean Tidal Models and Tidal Gravity Observation. *Okeanologiya [Oceanology]*, 60(1), 29–39. doi: 10.1134/S0001437020010221 [in Russian].
6. Arnautov, G. P. (2005). Results of international metrological comparison of absolute laser ballistic gravimeters. *Avtometriya*, 41(1), 126–136.
7. Riccardi, U., Rosat, S., & Hinderer, J. (2011). Comparison of the Micro-g LaCoste gPhone-054 spring gravimeter and the GWR-C026 superconducting gravimeter in Strasbourg (France) using a 300-day time series. *Metrologia*, 48, 28–39. doi:10.1088/0026-1394/48/1/003.
8. Hinderer, J., & Crossley, D. (2006). Two Decades of High Precision Gravimetry. *Newsletter*, 17, 2–12.
9. Dortman N. B. (Ed.). *Fizicheskie svoistva gornykh porod i poleznykh iskopaemykh (petrofizika). Spravochnik geofizika [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Handbook of geophysics]*. Moscow: Nedra Publ., 455 p. [in Russian].
10. Mironov, V. S. (1972). *Kurs gravirazvedki [Gravimetric survey course]*. Leningrad: Nedra, Leningradskoe otdelenie Publ., 511 p. [in Russian].
11. Gravity map of North-East part of U.S.S.R. and boarding seas, in reduction Bouguer (1:2500000 scale). (1968). Ministry of geology U.S.S.R., All-Union scientific researches Institute geophysical methods of reconnaissance of the U.S.S.R.
12. Ostach, O. M. (1994). Astronomy-geodesy leveling: retrospective view. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 3, 28–33 [in Russian].
13. *Karta vysot kvazigeoida nad ellipsoidom Krasovskogo, Masshtab 1:11700000 [Map of Quasigeoid heights in reference to the Krasovsky ellipsoid, 1:11700000 scale]*. (1996). Moscow: TsNIGAiK, Roskartografiya Publ. [in Russian].

14. Gryshinskii, N. P. (1983). *Osnovy gravimetrii [Principles of gravimetry]*. Moscow: Nauka Publ., P. 352 [in Russian].
15. Elsasser, W. M. (1971). Two-Layer Model of Upper-Mantle Circulation. *Journal of Geophysical Research*, 76(20), 4744–4753.
16. Nur, A., & Mavko, G. (1974). Postseismic viscoelastic rebound. *Science*, 183, 204–206.
17. Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M., & Imakiire, T. (2011). Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude 9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature*, 475, 373–376.
18. Pollitz, F. F. (2006). *VISCOID. Version 3. Tutorial*. Reston: USGS, 36 p. Retrieved from <http://earthquake.usgs.gov/research/software/VISCOID/manual.pdf>.
19. Segall, P. (2002). Integrating geologic and geodetic estimates of slip rate on the San Andreas fault system. *International Geology Review*, 44(1), 62–82. Retrieved from <https://doi.org/10.2747/0020-6814.44.1.62>.
20. Freed, A. M., Burgmann, R., Calais, E., Freymueller, J., & Hreinsdottir, S. (2006). Hreinsdottir Implications of deformation following the 2002 Denali, Alaska, earthquake for postseismic relaxation processes and lithospheric rheology. *Journal of Geophysical Research*, 111, B01401. doi: 10.1029/2005JB003894.
21. Shestakov, N. V., Gerasimenko, M. D., & Ohzono, Mako. (2011). Displacements and deformations Far East RF crust connected with Tohoku earthquake 11.03.2011 and it's influence to GNSS results. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 8, 35-43 [in Russian].
22. Zhao Qian, Fu Guangyu, & Wu Weiwei. (2019). Spatial-temporal evolution and corresponding mechanism of the far-field post-seismic displacements following the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake. *Congress IUGG*, G06p-311.
23. Vladimirova, I. S., Steblov, G. M., & Frolov, D. I. (2011). Investigation of viscosity-elastic deformation after Simyshirski earthquakes 2006–2007. *Fizika Zemli [Physics of the Earth]*, 11, 75–80 [in Russian].

Author details

Vladimir Ju. Timofeev – D. Sc., Chief Researcher.
Dmitriy G. Ardyukov – Ph. D., Senior Researcher.
Anton V. Timofeev – Ph. D., Senior Researcher.
Maxsim G. Valitov – Ph. D., Chief of Laboratory.
Igor S. Sizikov – Design Engineer.
Dmitrii A. Nosov – Software Engineer, Geodetic Engineer.
Yurii F. Stus – Ph. D., Senior Researcher.

Received 05.03.2022

© V. Ju. Timofeev, D. G. Ardyukov, A. V. Timofeev,
M. G. Valitov, I. S. Sizikov, D. A. Nosov, Yu. F. Stus, 2022