

Оценка относительной роли постсейсмического крипа и вязкоупругой релаксации после Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. с использованием данных спутниковой геодезии и гравиметрии

В. О. Михайлов,^{1,2,а} М. Диаман,^{3,б} Е. П. Тимошкина,^{2,а} С. А. Хайретдинов^{2,а}

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики Земли. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

² *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта, РАН. Россия, 123242 Москва, Б. Грузинская 10, стр. 1.*

³ *Institut de Physique du Globe de Paris Université Paris-Diderot. Bâtiment Lamarck A, case 7071 35-39 rue Hélène Brion 75205 Paris, France.*

Статья поступила 23.10.2017, принята к публикации 01.12.2017.

Спутники ГРЕЙС работали в космосе более 15 лет. За это время не только накоплены уникальные временные ряды ежемесячных моделей, но и существенно усовершенствованы методы обработки данных и подавления различных помех, в первую очередь связанных с избирательной чувствительностью вдоль и поперек орбиты, что позволило увеличить число сферических гармоник в ежемесячных моделях ГРЕЙС с 40 до 80 и даже 96. Это, в частности, открыло новые перспективы для исследования постсейсмических процессов в областях крупных землетрясений. В работе обсуждаются возможные геодинамические причины возникновения положительной аномалии гравитационного поля после Симуширского землетрясения 15 ноября 2006 г., рост которой начался через несколько месяцев после этого события и по времени совпал с активизацией сейсмичности на продолжении зоны косейсмического разрыва в глубину. Выполненное численное моделирование с использованием данных станций GPS и временных вариаций гравитационного поля показало, что вязкоупругая релаксация напряжений, возникших в результате землетрясения, играет подчиненную роль. Основным процессом, ответственным за постсейсмические смещения и рост гравитационной аномалии, является постсейсмический крип в обширной зоне вокруг области сейсмического разрыва, в том числе на его продолжении до глубины, достигающей 100 км.

Ключевые слова: спутники Грейс, временные вариации, гравитационное поле, землетрясения, постсейсмическая релаксация, Симуширское землетрясение.

УДК: 550.34. PACS: 91.45Hc.

ВВЕДЕНИЕ

Тандемная пара спутников ГРЕЙС (GRACE от англ. Gravity Recovery and Climate Experiment) была запущена 17 марта 2002 для детального изучения длинноволновой части гравитационного поля Земли. Высокая точность измерения гравитационного поля достигалась за счет: 1 — низкой орбиты спутников (в конце миссии 387 км), 2 — слежения за их орбитами не только с Земли, но и с работающих на высоких орбитах глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), 3 — учета действующих на спутники негравитационных ускорений с помощью акселерометров и 4 — использования микроволнового излучателя для высокоточного измерения расстояния между спутниками, которое в среднем составляло около 172 км. Получаемые данные используются для уточнения моделей статического гравитационного поля Земли, а также для построения ежемесячных моделей, которые впервые позволили регистрировать и изучать временные вариации глобального гравитационного поля. Главным преимуществом спутниковых гравитационных моделей является то, что они с постоянным интервалом по времени равномерно покрывают поверхность Земли, включая океаны и сушу.

Данные о временных вариациях гравитационного поля используются для изучения динамики океанов, мониторинга объема ледников, поверхностного стока и объема подземных пресноводных бассейнов. В геодинамике с использованием ежемесячных гравитаци-

онных моделей выполнены, например, исследования постледниковых поднятий Канадского и Балтийского щитов, косейсмических и постсейсмических процессов в районах недавних гигантских землетрясений.

Миссия ГРЕЙС была рассчитана на 5 лет, но спутники работали на орбите более 15 лет. Более того, за последние годы существенно повысилась точность и детальность гравитационных моделей за счет более точного определения орбит и расчета необходимых поправок. Современные модели содержат в два раза больше сферических гармоник, чем в начальный период, что существенно расширило возможные области их приложений. В частности, анализ 15-летней серии ежемесячных моделей ГРЕЙС позволяет выявлять и исследовать медленные изменения гравитационного поля во времени, в том числе с применением различных методов анализа временных рядов.

При построении современных моделей ГРЕЙС, содержащих высокие гармоники, применяются адаптивные фильтры. При сопоставлении реальных и теоретических аномалий к последним необходимо применить аналогичную фильтрацию. Поэтому в начале статьи рассмотрен вопрос выбора и калибровки такого фильтра. Далее мы обратимся к оценке относительной роли постсейсмического крипа и вязкоупругой релаксации на примере Симуширского землетрясения на Курилах 15/11/2006 с $M_w = 8.3$. Рассмотрены имеющиеся для этого района данные сейсмологии и геодезии и дана совместная интерпретация этих данных и постсейсмических вариаций гравитационного поля.

^а E-mail: mikh@ifz.ru

^б E-mail: diament@ipgp.fr

1. ГРАВИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СПУТНИКОВ ГРЕЙС

Для исследования временных вариаций глобального гравитационного поля используют ежемесячные модели, которые в первые годы работы спутников содержали 40 гармоник, а к настоящему времени содержат от $l_{\max} = 80$ (Центр исследований в области космической геодезии GRGS/CNES, Тулуза, Франция) до 96 гармоник (Центр космический исследований CSR, Хьюстон, США). В данной работе использованы модели GRGS. В этих моделях длина полуволны максимальной гармоники составляет $d = \pi R_z / l_{\max} \approx 250$ км, где R_z — средний радиус Земли.

Ежемесячные модели аномального гравитационного поля рассчитывают относительно среднего (статического) поля Земли. Из них исключают твердотельные приливы, трехмерные модели атмосферного давления и баротропную составляющую приливного эффекта океана. В результате эти модели содержат длиннопериодные по пространству временные вариации гравитационного поля, связанные с изменениями поверхностного стока и уровня подземных вод, с таянием ледников и динамикой снежного покрова, с бароклинной составляющей приливного эффекта и различными геодинамическими процессами (последние поднятия, землетрясения) и, конечно, различного рода помехи.

Использование высокоточных данных об изменениях расстояния между спутниками в процессе их движения по орбите повышает точность гравитационных моделей и одновременно порождает избирательную чувствительность ГРЕЙС вдоль и поперек направления полета. Если не применять специальную фильтрацию, то в ежемесячных гравитационных моделях обнаруживаются ложные полосовые аномалии, вытянутые вдоль спутниковых орбит. Для подавления этих аномалий разработаны специальные фильтры. Французский центр GRGS/CNES при построении последней версии своих моделей применяет метод усеченного SVD-разложения. Многие центры, включая CSR, применяют специальный адаптивный фильтр, называемый DDK [1], который в зависимости от индекса дает меньшее (DDK-1) или большее (DDK-8) сглаживание.

При сопоставлении теоретических и реальных данных необходимо к расчетным аномалиям применить ту же фильтрацию, что была применена на стадии построения ежемесячных моделей. Эта проблема несущественна при использовании малого числа гармоник, но становится актуальной при работе с гармониками выше 50-й. Отметим, что точно повторить фильтрацию, применяемую при построении гравитационных моделей, невозможно, поскольку фильтры являются адаптивными и настраиваются под исходные данные. Поэтому мы применяли к сферическим гармоникам ежемесячных моделей фильтр, используемый в пакете Static1D (<https://earthquake.usgs.gov/research/software/#STATIC1D>):

$$F(l) = 1 - \cos\left(\pi\left(1 - \frac{l}{L_{\max}}\right)\right), \quad (1)$$

который применяется только к гармоникам с $l > \frac{L_{\max}}{2}$, где $L_{\max}$ — число гармоник в теоретической модели.

Для калибровки этого фильтра нами была использована модель поверхности разрыва Суматранского землетрясения 2004 года, с высокой точностью определенная по данным сейсмологии, геодезии и данным приливных станций о высоте волн цунами [2]. В этой модели поверхность сейсмического разрыва была аппроксимирована набором прямоугольных элементов. В процессе решения мы определяли смещения по падению и по простиранию на каждом элементе путем минимизации функционала, который включал: 1 — среднеквадратическую невязку вычисленных и измеренных смещений на север и восток на пунктах GPS, нормированных на квадрат максимального смещения и 2 — невязку по гравитационному полю, нормированную на максимальное значение гравитационной аномалии и взятую с весовым множителем $\alpha < 1$. Для расчета смещений и гравитационного поля использована программа Static 1D, разработанная Ф. Поллитцем, в которой реализовано решение задачи о прямоугольной дислокации в сферически расслоенной самогравитирующей планете [3].

Наилучшее совпадение с измеренными смещениями и гравитационными аномалиями получено при расчете теоретических моделей до $L_{\max} = 100$ и $\alpha = 0.5$ (рис. 1). Следовательно, для наилучшего согласования с данными измерений теоретическое решение надо рассчитать до больших гармоник, чем содержится в гравитационных моделях (в данном случае до 100-й при 80 гармониках в моделях GRGS). Это связано с тем, что фильтр (1) сильно подавляет верхние гармоники, а гармонику с номером $L_{\max}$ устраняет полностью. Фильтр (1) применялся нами во всех последующих расчетах.

2. АНАЛИЗ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В ОБЛАСТЯХ КРУПНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Проведенное в работах [4, 5] сопоставление амплитуды косейсмических гравитационных аномалий с точностью моделей Грейс как функции номера сферической гармоники показало, что даже по моделям с 50 гармониками можно с вероятностью более 98 % выделить сигналы от землетрясений с магнитудой $M_w = 9$, с вероятностью около 60 % — с магнитудой $M_w = 8.8$. Для магнитуды $M_w = 8.6$ оценка составила 40 %, а для магнитуды 8.3 — не выше 33 %. И действительно, косейсмические гравитационные аномалии были зарегистрированы во всех трех областях сильнейших землетрясений XXI века: Суматра-2004, Мауле-2010 в Чили, Тохоку-2011 в Японии ([6–9] и многие другие). В то же время для многих землетрясений последних 15 лет с магнитудой 8–8.5 косейсмический скачок поля на фоне помех уверенно не выделяется. Для областей трех сильнейших землетрясений были также выделены и проанализированы постсейсмические вариации гравитационного поля (библиография дана, например, в [10]). На постсейсмическом этапе в областях этих землетрясений в основном происходил рост положительной аномалии над океаническим желобом.

Недавно был выполнен статистический анализ временных рядов гравитационных моделей, который позволил выделить области и время резкой смены поведения этих рядов [11]. Обнаружено, что в некоторых из таких областей изменение в поведении этих рядов

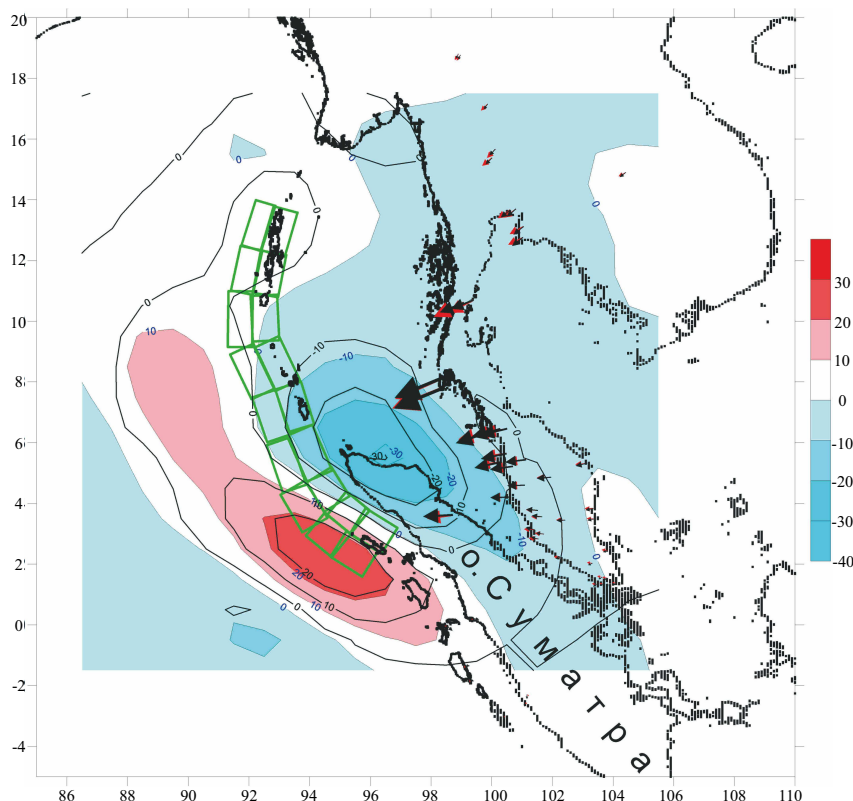


Рис. 1. Косейсмическая гравитационная аномалия в районе Суматранского землетрясения 24.12.2004. Цветная шкала и синие цифры — реальная аномалия (в микрогаллах), черные изолинии и цифры — теоретическая аномалия от модели [2], к которой применен фильтр (1) при $L_{\max} = 100$. Черные стрелки — реальные горизонтальные смещения на пунктах GPS, красные — расчетные смещения. Максимальный размер стрелки соответствует горизонтальному смещению 25 см. Зеленые прямоугольники — элементы модели поверхности разрыва

произошло после землетрясений с магнитудой 8–8.5, после которых, так же как и для трех сильнейших сейсмических событий, начался рост положительной гравитационной аномалии над океаническим желобом. Это области событий с магнитудой 8.5 у острова Суматра (землетрясения Ниасское 03/2005 и Бенкулу 09/2007) и у острова Хокайдо (09/2003), двух Симуширских землетрясений на Курильских островах 11/2006 и 01/2007 с магнитудой 8.3 и 8.1 и землетрясения у острова Самоа 09/2009 с магнитудой 8.1. Также устойчивые изменения гравитационного поля зарегистрированы после землетрясений в районе г. Сычуань, Китай, 05/2008 (8.0) и двух событий на трансформных разломах в бассейне Вартон в Индийском океане 11/04/2012 с магнитудой 8.6 и 8.2. Эти процессы не были выявлены ранее наземными методами.

Рост гравитационных аномалий после землетрясения может быть связан с процессом вязкоупругой релаксации или с постсейсмическим крипом на поверхности разрыва, вокруг нее или на ее продолжении в глубину. Решить вопрос об относительной роли перечисленных процессов только по данным спутниковой геодезии не удастся. Например, постсейсмические смещения на пунктах GPS для области Суматранского землетрясения 2004 г. могут быть полностью объяснены постсейсмическим крипом в нижней части поверхности сейсмического разрыва [12]. Хорошее согласование смещений по данным GPS с теоретическими смещениями получено и в рамках модели вязкоупругой релаксации в сферической, радиально расслоенной Земле [13]. В работе [13] для описания реологии астеносферы ис-

пользована реология Бюргерса, имеющая две вязкости: более высокую в установившихся процессах и более низкую в короткопериодных переходных процессах. Наилучшее согласование с данными GPS достигнуто при мощности упругой литосферы 60 км, мощности астеносферного слоя 160 км, вязкости астеносферы $4 \cdot 10^{17}$ Па·с для переходных процессов (элемент Кельвина) и вязкости 10^{19} Па·с для установившихся процессов (элемент Максвелла). Ниже располагался слой верхней мантии до глубины 660 км, который имел постоянную вязкость 10^{19} Па·с. Однако эти процессы не порождают наблюдаемой постсейсмической гравитационной аномалии. В ранее опубликованной нами работе [14] с использованием вязкоупругой модели с повреждаемостью было показано, что в дополнение к процессам вязкоупругой релаксации после Суматранского землетрясения 2004 г. могло произойти постепенное продвижение поверхности разрыва до глубины 60 км. Этот процесс полностью объяснил наблюдавшиеся постсейсмические изменения гравитационного поля.

3. АНАЛИЗ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ В РАЙОНЕ СИМУШИРСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В 2006–2007 гг. в районе о. Симушир (Центральные Курильские острова) произошли два близких по времени события: надвиг вдоль контакта литосферных плит 15 ноября 2006 г. ($M_w = 8.3$) и существенно меньший по магнитуде ($M_w = 8.1$) сброс на внешнем борту океанического желоба в погружающейся Тихоокеанской плите 13 января 2007 г. [15, 16]. Временные

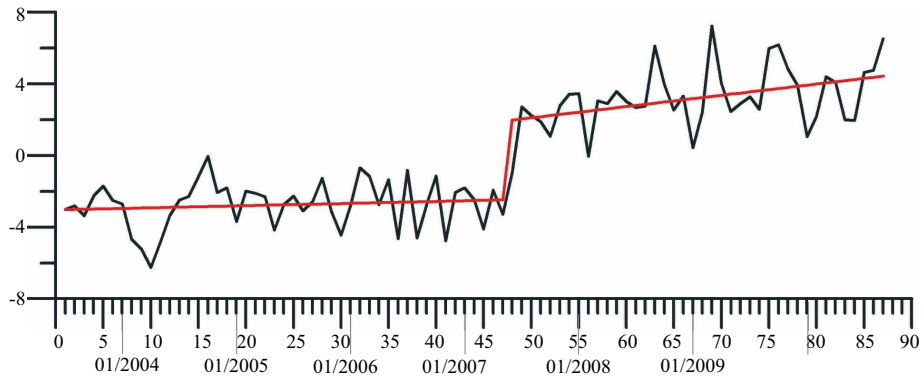


Рис. 2. Временные вариации гравитационного поля (мкГал) в области максимума постсейсмической гравитационной аномалии (156.50N, 46.50E) в районе Симуширских землетрясений. Красным цветом показаны два линейных тренда. Точка разрыва определена из условия максимального различия угла наклона трендов. По горизонтали — номера месяца. Рост поля начался в апреле 2007 г., а землетрясения произошли 15.11.2006 (месяц 41) и 13.01.2007 (месяц 43)

вариации гравитационного поля в этом районе несколько отличаются от вариаций в районах рассмотренных выше землетрясений. На рис. 2 показаны изменения во времени аномалии гравитационного поля в свободном воздухе в области ее максимального роста. Временной ряд на рис. 2 не имеет существенных трендов до марта 2007 г., также на фоне шумов невозможно идентифицировать скачки поля во время землетрясений 15.11.2006 и 13.01.2007 гг. Однако примерно с апреля 2007 г. начинается рост положительной гравитационной аномалии, который заметно превышает уровень шумов.

На Курильских островах развернута сеть станций GPS, часть из которых была установлена до землетрясения и зарегистрировала косейсмические смещения, остальные станции регистрировали смещения после землетрясений [16, 17]. В работе [17] показано, что постсейсмические смещения на пунктах GPS могут быть одинаково успешно описаны как вязкоупругой релаксацией, правда при очень низкой вязкости астеносферы (в интервале $2 \cdot 10^{17} - 10^{18}$ Па·с), так и постсейсмическим крипом на поверхности косейсмического разрыва. Выбор в пользу вязкоупругой релаксации был сделан в [17] потому, что на станциях GPS на островах Симушир, Кетой, Матуа, Харимкотан и Парамушир после землетрясений в основном наблюдалось поднятие, и вязкоупругая модель также дает поднятие на всех этих пунктах, за исключением острова Кетой. Постсейсмический крип в области сейсмического разрыва дает погружение на всех этих островах. Отметим, что это возражение снимается, если предположить, что постсейсмические смещения достигали большей глубины, что показано нами в работе [18].

Исследуем роль вязкоупругой релаксации. Для расчета смещений и гравитационных аномалий нами была использована модель дислокации в радиально расслоенной вязкоупругой сферической планете с учетом самогравитации [3]. Вначале, так же, как и для Суматры-2004, была построена модель поверхности разрыва для главного события 15.11.2006 на основе данных станций GPS [19]. Далее с использованием решения задачи о вязкоупругой релаксации в радиально расслоенной самогравитирующей планете [20], реализованной в программном пакете Visco1D (<https://earthquake.usgs.gov/research/software/#VISCO1D>), были рассчитаны смещения на станциях GPS для реологической модели Бюргерса (элемент Кельвина с вязкостью

$2 \cdot 10^{17}$ Па·с и элемент Максвелла с вязкостью 10^{19} Па·с) и модели Максвелла для двух значений вязкости $2 \cdot 10^{17}$ Па·с и 10^{19} Па·с. На рис. 3 в качестве примера приведены смещения на восток на станции, установленной на о. Кетой. Из рисунка следует, что наилучшее согласие с реальными данными достигается, если принять для описания астеносферы реологию Максвелла с низкой вязкостью астеносферы. Аналогичный результат получен в [21].

В работе [22] было выполнено моделирование процесса вязкоупругой релаксации с использованием реологии Максвелла с вязкостью $2 \cdot 10^{17}$ Па·с и рассчитана гравитационная аномалия, которая хорошо совпала с реальными данными. На этом основании был сделан вывод, что гравитационные данные подтверждают гипотезу об аномально низкой вязкости астеносферы в области Курильских островов. Здесь, однако, следует учесть, что в работе [22] использованы гравитационные модели, содержавшие только 50 сферических гармоник, хотя были доступны и модели более высокого разрешения. Что изменится, если использовать гравитационные модели высокого разрешения?

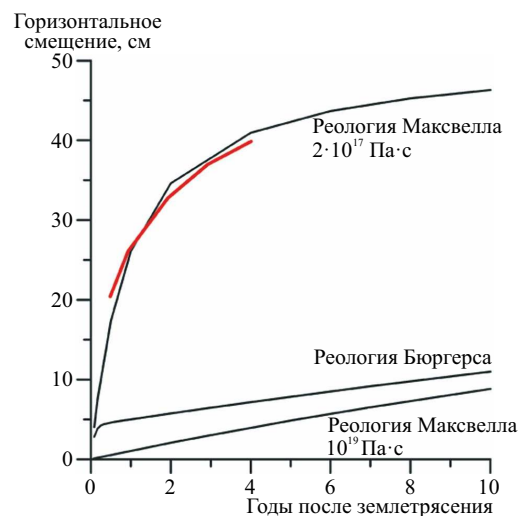


Рис. 3. Смещения на восток на станциях GPS на острове Кетой [21]. Красная кривая — измеренные суммарные смещения в сантиметрах. По горизонтали годы с момента землетрясения 15.11.2006. Черные кривые — смещения по вязкоупругим моделям Бюргерса и Максвелла при различной вязкости астеносферы

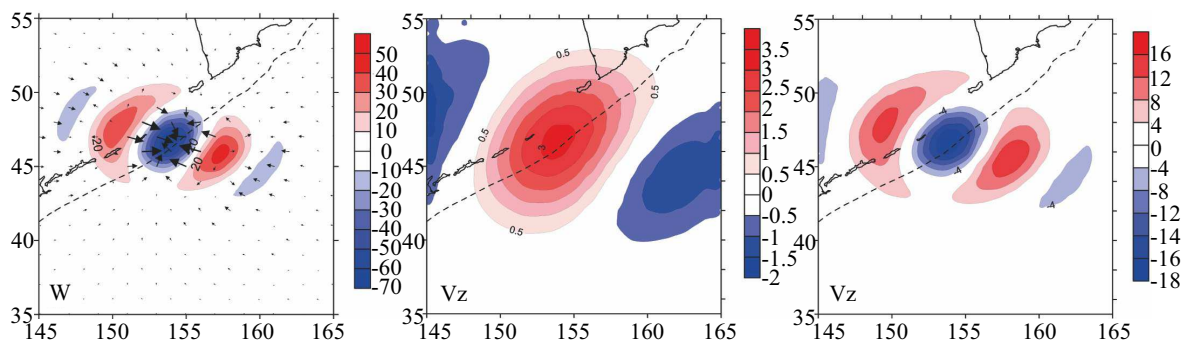


Рис. 4. Вертикальные смещения в миллиметрах (а) и гравитационные аномалии (б, в) в результате процесса вязкоупругой релаксации после землетрясений в районе о. Симушир. Использована реология Максвелла с вязкостью $2 \cdot 10^{17}$ Па·с. Гравитационные аномалии (мкГал) рассчитаны до 50-й (б) и 100-й (в) сферических гармоник за период с 03.2007 по 07.2016 гг. Фильтр (1) применен только при расчете аномалий высокого разрешения (в)

Как и в работе [22], мы провели моделирование процесса вязкоупругой релаксации с использованием реологии Максвелла с вязкостью $2 \cdot 10^{17}$ Па·с. На рис. 4, а, б приведены амплитуда вертикальных смещений и аномалия силы тяжести. Аномалия рассчитана до 50-й сферической гармоники. На островах Курильской дуги происходит поднятие, а гравитационная аномалия представляет собой единый максимум с амплитудой 3 мкГал. Реальные гравитационные аномалии в моделях Грейс, рассчитанных до 50-й и до 96-й гармоник, также имеют единый максимум над Курильскими островами. Распределение вертикальных смещений аналогично полученным в работе [17, 21].

На рис. 4, в приведены аналогичные расчеты с использованием 100 сферических гармоник и фильтра (1). Видно, что при более высоком разрешении теоретическая положительная аномалия распадается, в ее центре появляется минимум. Этот результат противоречит экспериментальными данными.

Итак, гравитационные модели, содержащие 80 гармоник, не свидетельствуют в пользу аномально низкой вязкости астеносферы в области Курильских островов. В качестве альтернативы можно предположить, что смещения, которые начались сразу после землетрясения и продолжались до апреля 2007 г., по всей вероятности, являлись результатом действия обоих процессов: и вязкоупругой релаксации и, возможно, постсейсмического крипа. До марта 2007 г. афтершоки происходили на небольшой глубине, но уже в марте-апреле 2007 г. гипоцентры землетрясений начали смещаться в глубокие части погружающейся плиты [11]. Это указывает на возможное начало смещений вдоль контакта плит на продолжении в глубину поверхности сейсмического разрыва. Распределение эпицентров в плане указывает на то, что область смещений в 2007 г. была существенно больше области косейсмического разрыва [11].

Для получения наблюдаемой гравитационной аномалии нами был рассчитан гравитационный эффект от смещений по простиранию (надвиг) на двух плоскостях [11, 18]. Верхняя плоскость расположена у поверхности. Она имеет угол падения 15° , длину по простиранию 300 км и по падению 100 км и включает поверхность разрыва ноябрьского землетрясения 2006 г. Вторая плоскость является продолжением первой в глубину. Она имеет угол падения 25° , такой же размер по простиранию и длину по падению 142 км.

Гравитационный эффект рассчитан до 100-й гармоники с применением фильтра (1). Для того чтобы получить суммарную амплитуду тренда, зарегистрированного в реальных данных, достаточно, чтобы амплитуда надвига на верхней плоскости за 5.5 лет после землетрясения составило 3 м, а на нижней плоскости 1.5 м. Учитывая размеры поверхности постсейсмического крипа, суммарный сейсмический момент эквивалентен землетрясению магнитудой около $M_w = 8.5$ [18].

Полученные результаты свидетельствуют, что вязкоупругая релаксация играла подчиненную роль, основным процессом являлся постсейсмический крип. В этом случае нет необходимости предполагать, что в районе Курильских островов вязкость астеносферы существенно понижена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопрос о том, с каким геодинамическим процессом связаны смещения и гравитационные аномалии в зонах субдукции после крупных землетрясений активно обсуждается в литературе. Результаты моделирования для области Симуширских землетрясений показывают, что предположение о том, что основную роль здесь играли процессы вязкоупругой релаксации, при аномально низкой вязкости астеносферы $2 \cdot 10^{17}$ Па·с в установившихся процессах, не согласуется с реальными гравитационными данными высокого разрешения. Следует отметить, что реологическая модель Бюржера с низкой вязкостью в переходных процессах и «общепринятой» вязкостью в длительных процессах успешно применялась в работах Ф. Поллитца с соавторами для целого ряда землетрясений, но в случае Симуширского землетрясения она дает слишком маленькие смещения. Процесс постсейсмического крипа лучше согласуется с экспериментальными данными [11, 18].

Авторы признательны коллегам из GRGS/CNES за предоставленные данные и консультации по вопросам построения спутниковых гравитационных моделей. Авторы благодарят Ф. Поллитца (Геологическая служба США) за предоставленные программные коды. Методика калибровки данных ГРЕЙС и моделирования сейсмического цикла с использованием программных пакетов Static1D и Visco1D разработаны при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00159). Расчеты с использованием реальных данных выполнены в рамках госзадания по теме 0144-2014-00105.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kusche J. // J. of Geodesy. 2007. **81**, N 11. P. 733.
2. Lorito S., Piatanesi A., Cannelli V. et al. // *J. Geophys. Res.* 2010. **115**. B02304.
3. Pollitz F.F. // Earth. Geophys. J. Int. 1996. **125**. P. 1.
4. Mikhailov V., Tikhotsky S., Diamant M. et al. // *Earth and Plan. Sci. Lett.* 2004. **228**, N 3–4. P. 281.
5. de Viron O., Panet I., Mikhailov V. et al. // *Geophys. J. Int.* 2008. **174**. P. 14.
6. Han S.-C., Shum C.K., Bevis M. et al. // *Science*. 2006. **313**. P. 658.
7. Panet I., Mikhailov V., Diamant M. et al. // *Geophys. J. Int.* 2007. **171**. P. 177.
8. Panet, I., Pollitz F., Mikhailov V. et al. // *Geochemistry, Geophys., Geosystems (G3)*. 2010. **11**. Q06008.
9. Matsuo K., Heki K. // *Geoph. Res. Lett.* 2011. **38**. L00G12.
10. Михайлов В. О., Пане И., Хаен М., Тимошкина Е. П. // Изв. РАН. Физика Земли. 2014. № 2. С. 29. (Mikhailov V.O., Pane I., Haen M., Timoshkina E.P. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2014. **50**, N 2. P. 177.)
11. Михайлов В. О., Диаман М., Любушин А. А. и др. // Изв. РАН. Физика Земли. 2016. № 5. С. 70. (Mikhailov V.O., Diamant M., Lyubushin A.A. et al. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016. **52**, N 5. P. 692.)
12. Hashimoto M., Choosakul N., Hashizume M. et al. // *Earth Planets Space*. 2006. **58**. P. 127.
13. Pollitz F., Banerje P., Burgmann R. // *Earth, Geophys. J. Int.* 2006. **167**. P. 397.
14. Mikhailov V., Lyakhovsky V., Panet I. et al. // *Geophysical J. Int.* 2013. **194**, N 2. P. 640.
15. Lay T., Kanamori H., Ammon C.J. et al. // *J. Geophys. Res.* 2009. **114**. B11308.
16. Стеблов Г. М., Василенко Н. Ф., Прытков А. С. и др. // Изв. РАН. Физика Земли. 2010. № 5. С. 77. (Steblov G. M., Vasilenko N. F., Prytkov A. S. et al. // *Izv. Phys. Solid Earth*. 2010. **46**, N 5. P. 440.)
17. Kogan M., Vasilenko N., Frolov D. et al. // *Geoph. Res. Lett.* 2011. **38**. L06304.
18. Михайлов В. О., Тимошкина Е. П., Диаман М. // Доклады РАН. Сер. Геофизика. 2016. **471**, № 2. С. 219. (Mikhailov V.O., Timoshkina E.P., Diamant M. A. // *Doklady Earth Sciences*. 2016. **471**, N 1. P. 1188.)
19. Steblov G. M., Kogan M. G., Levin B. V. et al. // *GRL*. 2008. **35**. L22306.
20. Pollitz F.F. // *J. Geophys. Res.* 1997. **102**. P. 17, 921.
21. Kogan M. G., Vasilenko N. F., Frolov D. I., Frymueller J. T. // *Journ. Geophys. Res.* 2013. **118**. P. 3691.
22. Han S., Sauber J., Pollitz F. // *Geophys. Res. Lett.* 2016.

Assessment of the Relative Roles of Viscoelastic Relaxation and Postseismic Creep in the Area of the Simushir Earthquake of November 15, 2006, Using Space Geodesy and Gravimetry

V. O. Mikhailov^{1,2a}, M. Diamant^{3b}, E. Timoshkina^{2a}, S. A. Khairtudinov^{2a}

¹Department of physics of the Earth, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

²Schmidt Institute of physics of the Earth RAS, 10 B. Gruzinskaya, Moscow 123995, Russia.

³Institut de Physique du Globe de Paris Université Paris–Diderot. Bâtiment Lamarck A, case 7071 35-39

rue Hélène Brion 75205 Paris, France

E-mail: ^amikh@ifz.ru, ^bdiamant@ipgp.fr.

The GRACE satellites have been operating in space for more than 15 years. Over this period, not only unique time series of monthly models were accumulated, but also the methods for data processing and suppression of different errors, primarily related to different sensitivity along and across the orbit, were substantially improved. This allowed the number of spherical harmonics in the GRACE monthly models to be increased from 40 up to 80 and even 96. This, in particular, opened new opportunities for investigating postseismic processes in the regions of major earthquakes. In this paper we discuss possible geodynamic processes that may be responsible for the growth of a positive gravity-field anomaly after the Simushir earthquake on November 15, 2006. The growth started a few months after this event and coincided in time with the activation of seismicity on the continuation of the zone of the coseismic rupture in depth. Numerical simulation using data from GPS stations and temporal variations of the gravity field has shown that the viscoelastic relaxation of stresses resulting from an earthquake plays a subordinate role. The main process that is responsible for postseismic displacements and the growth of the gravity anomaly is the postseismic creep in a vast zone around the coseismic rupture, including its continuation to a depth of 100 km.

Keywords: GRACE satellite, temporal variations, gravity field, earthquakes, postseismic relaxation, Simushir earthquake. **PACS:** 91.45Hc.

Received 23 October 2017.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. **73**, No. 5. Pp. 551–557.

Сведения об авторах

1. Михайлов Валентин Олегович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; e-mail: mikh@ifz.ru.
2. Diamant Michel — PhD, professor; e-mail: diamant@ipgp.fr.
3. Тимошкина Елена Павловна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник.
4. Хайретдинов Станислав Ахмедович — науч. сотрудник.