

УДК 528.85; 550.34

МОНИТОРИНГ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Ким А.С., Литвинов Ю.Г., Андреев А.Б., Капытин В.И.

Институт ионосферы Национального центра космических исследований и технологий, Алматы, Казахстан

По результатам обработки гравиметрических данных со спутников GOSE и GRACE получена глобальная гравиметрическая карта вертикального градиента силы тяжести и гравиметрическая карта для региона Северного Тянь-Шаня. При построении вертикального градиента силы тяжести на высоте спутника использованы данные гравитационного градиента с сайта Европейского космического агентства. Предоставленные форматы данных гравитационного градиента заданы двумя основными подмножествами файлов: гравитационных градиентов в системе отсчета градиентометра (GRF) и градиентов в системе отсчета, поворачивающейся относительно наземной системы отсчета (TRF), в частности, в сферической локально ориентированной на север системе отсчета (LNOF). Градиенты гравитационного градиента на 225 км и 255 км над эллипсоидом были рассчитаны с использованием в качестве исходных данных градиентов гравитации GRACE-GOCE вдоль орбиты. Спутниковые гравитационные данные применены для анализа сейсмоактивных зон. В результате исследований установлено, что эпицентры очагов крупных землетрясений коррелируют с расположением зон резких изменений вертикального градиента силы тяжести.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным взглядам, землетрясения отражают процесс геологического преобразования планеты. Считается, что первопричиной землетрясений являются глобальные геологические и тектонические силы. Большинство землетрясений возникает на окраинах тектонических плит. Замечено, что за последние два века сильные землетрясения возникали в результате вспарывания крупных разломов, выходящих на поверхность. Считается доказанной связь напряженного состояния земных недр, которое проявляется на поверхности Земли, с изменениями ее гравитационного поля. Изучение неприливных вариаций силы тяжести является важнейшим аспектом исследований современной геодинамики. Эта проблема лежит также в основе наиболее перспективных направлений прогнозирования землетрясений. Вариации силы тяжести вблизи очаговой зоны могут быть обусловлены целым рядом геофизических и тектонических причин [1]:

- доходящее до критического уровня напряженное состояние очаговой зоны приводит либо к сжатию и, следовательно, к уплотнению пород, либо к растяжению и снижению их плотности;
- критические напряжения в очаговой зоне готовящегося землетрясения приводят к активным движениям флюидов в пластах Земли, в результате чего, в колодцах и скважинах наблюдается либо подъем, либо спад уровня грунтовых вод перед землетрясениями;
- при достижении напряжениями критических величин начинается массовое трещинообразование в очаговой зоне и прилегающей к ней области, что вызывает нарушение сплошности пород и их разуплотнение;
- деформационные процессы, возникающие в очаговой зоне перед землетрясением, приводят к появлению участков повышенной и пониженной плотности.

Все перечисленные факторы, приводящие к изменениям силы тяжести, имеют небольшой радиус действия вблизи очаговых зон готовящихся сильных землетрясений. Это определяется тем, что эффект изменения силы тяжести, связанный с геодинамическими процессами в очаговой зоне, быстро уменьшается с расстоянием и может наблюдаться в радиусе от десятков до сотен километров от очаговой зоны.

1 ИЗМЕНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ И СЕЙСМИЧНОСТЬ

После землетрясения магнитудой 7,2 в Синтае в 1966 г. в Китае для прогноза землетрясений начали проводить сейсмологический гравитационный мониторинг. Когда в 1976 г. произошло Тяньшаньское землетрясение магнитудой 7,8, проводился мониторинг силы тяжести вблизи эпицентра и были записаны флуктуации гравитационного поля. После ряда сильных землетрясений в стране была развернута густая сеть измерительных пунктов для регистрации силы тяжести (рисунок 1). Перед Вэньчуаньским землетрясением, которое произошло 12-го мая 2008 г., в Китае был сделан среднесрочный прогноз землетрясения, основанный на данных гравитационных измерений [2]. Предсказанный эпицентр и магнитуда совпали с реальными данными. Этот прогноз землетрясения является пока самым точным прогнозом в Китае и глобальном масштабе.

Влияние деформаций, происходящих внутри Земли, на изменения силы тяжести на дневной поверхности вблизи очагов землетрясений приведено в [3]. В этом исследовании систематически обрабатывались данные измерения силы тяжести наземными измерительными комплексами, горизонтальной деформации из GPS-данных и фоновой вертикальной деформации, полученной из нивелирующих измерений.

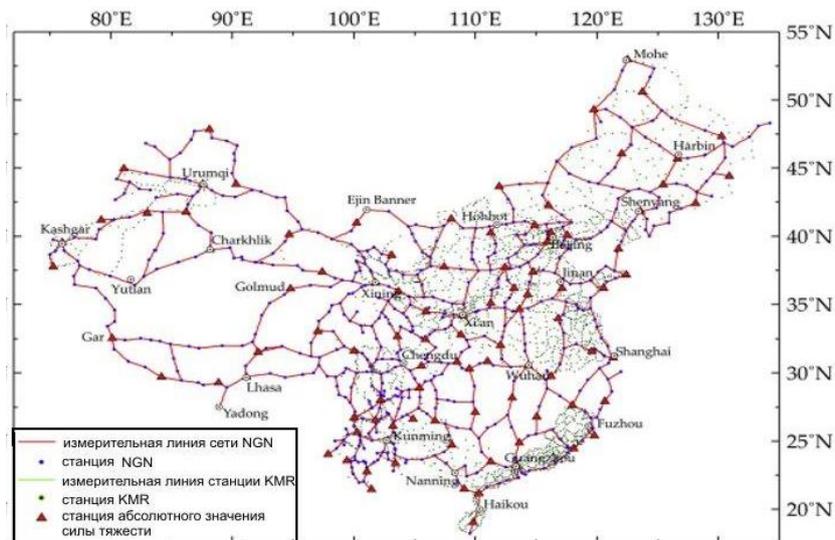


Рисунок 1. Распределение сети мониторинга сейсмической гравитации в материковом Китае [2]

Анализ позволил сделать следующие выводы:

1) региональная гравитация изменяется, GPS и вертикальная деформация показали интенсивную пространственную взаимосвязь: гравитация увеличилась вместе с направлением горизонтального движения и уменьшилась с подъёмом земной коры и наоборот, что отражает унаследованные характеристики геотектонической активности;

2) деформации коры были тесно связаны с активными разломами. Контурные линии гравитационных изменений и вертикальной деформации, как правило, сопровождалась разломом Килиана-Хайюаня (простирается – NWW), а горизонтальная деформация земной коры показала движение скольжения влево-латеральное вблизи разлома Килиана-Хайюаня;

3) землетрясение Менюань $M_s=6,4$ произошло в области сильного отрицательного изменения гравитации и в областях с сильным градиентом, где величина изменения гравитации от положительного к отрицательному составила 110 мГал. В частности, граница между положительной и отрицательной гравитацией, расположенная на юге от эпицентра землетрясения, интенсивно проходит вдоль северного края разлома Циляншан. Деформация экструзии, скорость поверхностного сжатия и изменение силы тяжести были очевидны вблизи эпицентра землетрясения 2016 г. в Менюане.

2 ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ДАННЫХ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ И КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОЧАГОВЫХ ЗОНАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

2.1 Научно-исследовательский спутник GOCE

17.03.2009 г. запущен научно-исследовательский спутник **GOCE** (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*) проекта ЕКА (Европейского космического агентства) для исследования гравитационного поля Земли и установившихся океанских течений [4]. Главной полезной нагрузкой спутника

был электростатический гравитационный градиометр, состоявший из 6 акселерометров и предназначенный для изучения гравитационного поля Земли и геоида. Спутник GOCE был запущен с космодрома Плесецк на солнечно-синхронную орбиту с наклоном $96,70^\circ$. Разделение спутника с последней ступенью ракеты-носителя произошло на высоте 283,5 км, что всего на 1,5 км меньше запланированной. Спутник прекратил существование 11.11.2013 г.

Стреловидная форма спутника, а также его «плавники», помогали спутнику сохранять ориентацию и уменьшали торможение в верхней атмосфере, которое довольно значительно на высоте его полета – около 260 км. Низкая орбита спутника и высокая точность акселерометров в 10^{-12} м/с^2 позволили к окончанию наблюдений улучшить точность определения геоида до 1–2 см на масштабах порядка 100 км [4]. Для компенсации атмосферного торможения и других негравитационных воздействий на спутнике был установлен непрерывно работавший ионный двигатель, использовавший для создания импульса ионизированные атомы ксенона. Данные спутника GOCE нашли многочисленные применения, в том числе при изучении опасных вулканических регионов и прояснении поведения океана. К сентябрю 2009 г. спутник спустился до номинальной орбиты высотой 254,9 км. Всё это время происходила проверка всех систем спутника, включая его ионный двигатель.

Спутник GOCE контролировался Европейским центром космических операций (ESA/ESOC) в Дармштадте, Германия. Научные данные обрабатывались и архивировались наземным сегментом данных полезной нагрузки (PDGS), расположенным в ESA/ESRIN недалеко от Рима, Италия. Дальнейшая обработка данных выполнялась с использованием Средств обработки высокого уровня (HPF), работавших по контракту ESA с консорциумом европейских

институтов European GOCE Gravity Consortium [5]. GOCE – первый космический аппарат, использовавший концепцию градиентометрии, то есть измерения разности ускорений на коротких базовых линиях между контрольными массами набора акселерометров GOCE Electrostatic Gravity Gradiometer. 29 июня 2010 г. ЕКА обнародовало первые модели поля тяготения Земли, построенные по данным спутника GOCE [6]. Несмотря на то, что для построения моделей использовались наблюдения, сделанные на протяжении только двух месяцев, точность полученных результатов на масштабах порядка 100 км превосходит точность всех более ранних моделей, основанных на многолетних наблюдениях посредством других гравиметрических спутников, включая спутниковую миссию GRACE. С 31 марта по 1 апреля 2011 г. в Мюнхенском техническом университете состоялось четвертое международное рабочее совещание пользователей данных GOCE (4th International GOCE User Workshop), где был анонсирован ряд моделей гравитационного поля Земли второго поколения.

Из-за исключительно низкого уровня солнечной активности в первой половине 2009 г. и в последующие годы, большая часть периода ввода в эксплуатацию (с марта по сентябрь) была потрачена на снижение орбиты спутника посредством естественного спада без перетаскивания на основе ионных двигателей. Постепенный спад был остановлен на средней высоте 254,9 км в середине сентября 2009 г. По причине этих манипуляций первый набор данных GOCE охватывает период с 01.11.2009 г. по 30.11.2009 г. Этот и более поздние наборы данных GOCE (до 30.11.2010 г.) доступны через виртуальный онлайн-архив GOCE (VOA).

2.2 Спутниковая гравиметрия миссии GRACE

В рамках реализации совместного германо-американского проекта GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) [7] 17.03.2002 г. с космодрома Плесецк были запущены два спутника GRACE-1 и GRACE-2. Запуск их был осуществлен на близкие почти круговые близполярные ($i = 89^\circ$) орбиты с номинальной высотой 485 км, при этом расстояние между спутниками изменялось в пределах от 170 до 270 км. Каждый из этих спутников был оснащен следящей бортовой аппаратурой:

- двухчастотный (24,5 ГГц и 32,7 ГГц) радиодальномером, характеризующимся ошибкой единичного измерения дальности 10 микрон. Дифференцирование массива дальностей по времени позволяло определять относительную лучевую скорость объектов с ошибкой 0,1 мк/с;

- 24-х канальный двухчастотный GPS-приемник;
- высокоточный 3-х компонентный акселерометр;
- звездная видеокамера, позволявшая определять ориентацию основных осей спутника среди звезд с ошибкой не хуже 10 дуговых секунд.

Спутники непрерывно обменивались радиосигналами в микроволновом диапазоне, что позволяло с

микронной точностью отслеживать изменение расстояния между ними. Спутники пролетали над каждым участком Земли приблизительно раз в месяц, прослеживая изменения гравитационного поля. Проектом была реализована комбинация двух вариантов межспутникового слежения (LL SST + HL SST) как между низкими, так и низкими и высокими искусственными спутниками Земли (ИСЗ). Первый набор наблюдений ежемесячных изменений гравитационного поля Земли был предоставлен миссией-спутником GRACE-1, начавшейся в марте 2002 г. Осенью 2012 г., после более чем 10-летней успешной работы на орбите, американо-германская миссия GRACE-1 продемонстрировала свою выдающуюся способность мониторить массовые движения в системе Земли с беспрецедентной точностью и временным разрешением. Полученные результаты были использованы для оперативного определения параметров геопотенциала в среднем и высоком диапазонах частот. По данным GRACE была построена наиболее точная на данное время карта глобального гравитационного поля Земли. В октябре 2017 г. было принято решение о завершении научной миссии GRACE в связи с износом спутников [8–9]. Спутник GRACE-2 вошёл в атмосферу 24.12.2017 г. [10], спутник GRACE-1 вошёл в атмосферу 10.03.2018 г. [11].

Повышение точности и разрешающей способности ежемесячных моделей глобального гравитационного поля спутников GRACE, а также накопление более чем десятилетней серии таких моделей, позволило выявить неисследованные ранее процессы, происходящие в областях крупных ($M_w > 8$) землетрясений [12]. Временные вариации гравитационного поля в областях гигантских землетрясений, таких как Суматра-2004, Чили-2010, Тохоку-2011, включали ко-сейсмический скачок гравитационного поля, за которым следовали длительные постсейсмические изменения, достигавшие почти такой же амплитуды. Ко-сейсмические скачки поля в результате событий меньшей магнитуды практически незаметны, но после целого ряда землетрясений обнаружен длительный устойчивый рост гравитационных аномалий. Устойчивые изменения гравитационного поля также зарегистрированы после землетрясения в районе г. Сычуань, Китай 05/2008. Был зарегистрирован рост положительной аномалии гравитационного поля после Симуширского землетрясения 11/2006, который начался через несколько месяцев после этого события и по времени совпал с активизацией сейсмичности на продолжении зоны ко-сейсмического разрыва в глубину. Рост гравитационной аномалии во всех перечисленных выше районах указывает на крупномасштабный асейсмический кризис в областях, значительно превосходящих по размерам очаговую зону землетрясения. Эти процессы не были выявлены ранее наземными методами.

Измерение пространственного и временного изменения гравитационного поля из космоса, вызван-

ного изменениями массы, предоставляет уникальную возможность для исследований массового распределения и улучшения нашего понимания планеты Земля. Результаты миссии GRACE произвели революцию в области исследований гравитационного поля Земли и установили необходимость будущих спутниковых гравитационных миссий [13].

2.3 Миссия GRACE-FO (эксперимент по гравитационному восстановлению и климату)

22.05.2018 г. с базы ВВС Ванденберг на центральном побережье Калифорнии с помощью ракеты Falcon 9 были выведены два орбитальных спутника миссии GRACE-FO [14]. Спутники GRACE-FO продолжают исследование, начатое первоначальной миссией GRACE, которая доказала, что движение воды можно отслеживать с высокой точностью по его воздействию на гравитационное поле Земли. GRACE-FO продолжают регистрировать региональные изменения в гравитации в связи с изменениями в ледниках, грунтовых водах, уровне моря и в нашей планете в целом [15]. Миссия GRACE-FO (также известная как GFO) сосредоточена на поддержании непрерывности данных от GRACE и минимизации любого разрыва данных после GRACE. Основная цель миссии GRACE-FO – продолжить ежемесячное изучение глобальной модели гравитационного поля Земли с высоким разрешением в течение ожидаемой продолжительности 5 лет.

3 ГРАВИТАЦИОННЫЕ ГРАДИЕНТЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

3.1 Комбинированная модель GRACE/GOCE для расчета градиентов гравитации

На уровне градиента гравитации была осуществлена комбинация информации со спутников GRACE и GOCE. Поскольку гравитационные градиенты GOCE подвержены длинноволновой ошибке, эта спектральная часть заменена модельными градиентами. Комбинация GOCE и градиентов модели выполняется с наивысшим приоритетом при сохранении наиболее надежной информации GOCE в градиентах. При этом предполагается, что часть средней длины волны также будет получена из наблюдений GOCE (хотя GRACE также может способствовать этому спектральному режиму). Градиенты модели, которые заменяют длинноволновую часть наблюдений GOCE, рассчитываются на основе комбинированной модели GRACE/GOCE, а именно GOCO03 [16]. Эта модель включает 8-летние данные GRACE и 12-месячные данные GOCE. Сравнение последних моделей GOCE только с гравитационным полем и GOCO03 показывает различия между коэффициентами сферических гармоник (что может быть связано с большим весом информации GRACE).

Длинноволновые градиенты, полученные из GOCO03, имеют высокую точность. По сравнению с комбинированными моделями, такими как, например, EIGEN-6C, GOCO03s [17] показывают хорошую

согласованность ошибок. Для комбинированных градиентов градиенты модели и наблюдения GOCE должны быть отфильтрованы вдоль трассы. После выполнения фильтрации наблюдений градиента гравитации может быть установлен полный тензор градиента гравитации, где менее точные компоненты (V_{xy} и V_{yz}) установлены на ноль и заменены чистой информацией о модели. Процедура расчета представлена на рисунке 2 со следующими шагами [17]:

1) Вычисляются улучшенные градиенты из комбинации данных GOCE с высоким пространственным разрешением и градиентов на основе GRACE для низкого пространственного разрешения. Данные GOCE являются фильтром верхних частот (HPF), градиенты GRACE – фильтром нижних частот (1-HPF).

2) Используется метод удаления-вычисления-восстановления, который минимизирует, например, краевые эффекты в оценочных региональных сетках. Градиенты, полученные из GOCO03, используются для уменьшения улучшенных градиентов.

3) Оцениваются остаточные плотности для тессероидов из T_{xx} , T_{yy} , T_{zz} и T_{xz} .

4) Прогнозируются T_{zz} в глобальной сферической сетке в 225 км над опорной областью вдали от коммутационной работы региональных сетей, а также оценки шума, используя интегральное уравнение Пуассона.

5) Используется синтез сферических гармоник для вычисления градиентных сеток для всех градиентов на 225 км и 255 км над эллипсоидом и добавляется обратно в GOCO03 (этап восстановления) в течение 10 дней.

3.2 Построение вертикального градиента силы тяжести

Для построения вертикального градиента силы тяжести на высоте спутника нами были использованы данные гравитационного градиента с сайта <http://eo-virtual-archive1.esa.int/GOCEGradients.html>. Предоставленные форматы данных задаются двумя основными подмножествами файлов. Сначала GRACE / GOCE измеряли гравитационные градиенты в системе отсчета градиентометра (GRF), а затем градиенты измерялись в системе отсчета, поворачивающейся относительно наземной системы отсчета (TRF), в частности, в сферической локально ориентированной на север системе отсчета (LNOF). Градиенты гравитационного градиента на 225 км и 255 км над эллипсоидом были рассчитаны с использованием в качестве исходных данных градиентов гравитации GRACE-GOCE вдоль орбиты. В каждом ряду вычислительной сети имеются долгота и широта в градусах, а затем V_{xx} , V_{xy} , V_{yz} , V_{zz} , V_{yz} , V_{yy} в E (Eötvös, $1 E = 10^{-9} \text{с}^{-2}$). Высота над эллипсоидом указывается в имени файла. Данные от номинальной миссии были использованы для расчета сеток на 255 км, данные от расширенной пропущенной фазы – для расчета сеток на 225 км.

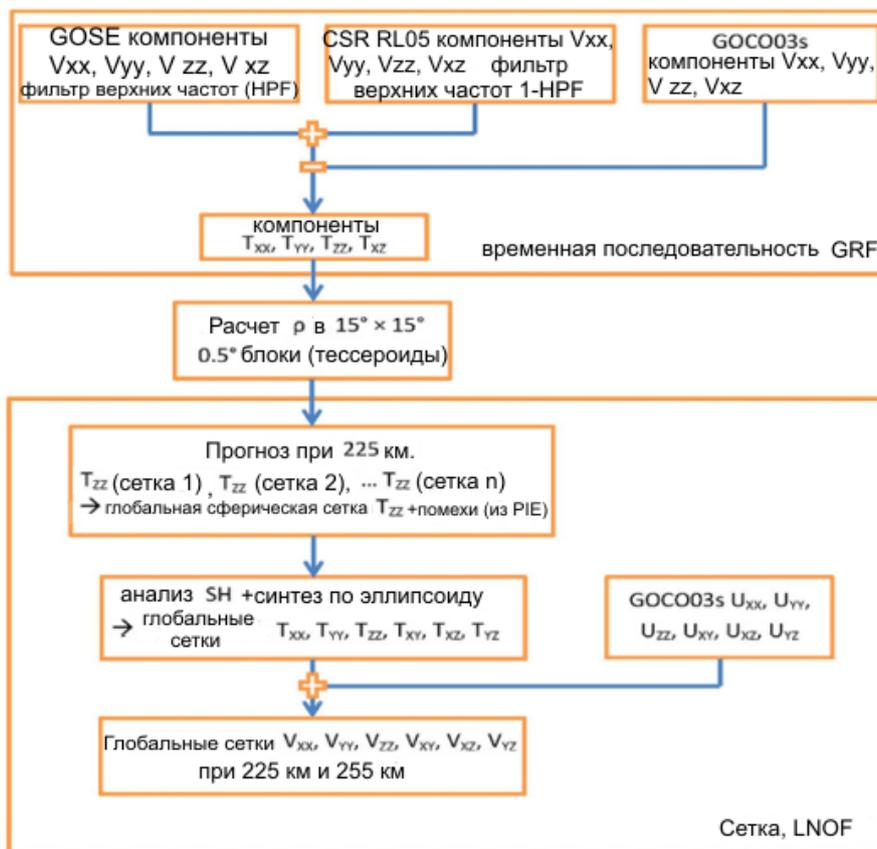


Рисунок 2. Блок-схема вычислительной процедуры для достижения гравитационных градиентных сеток [17]

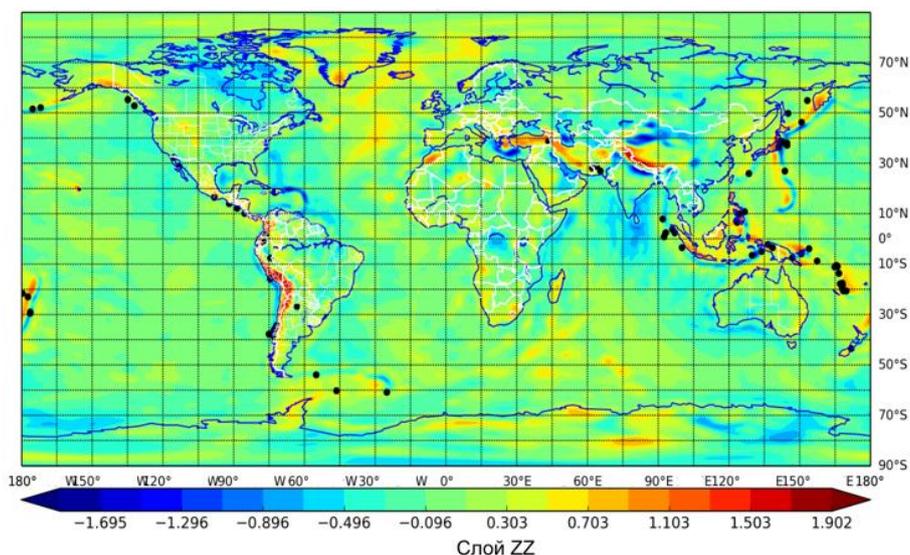


Рисунок 3. Вертикальный градиент силы тяжести с эпицентрами крупных землетрясений

На рисунке 3 приведен построенный вертикальный градиент силы тяжести на поверхности Земли по спутниковым данным на высоте 225 км. Точками обозначены крупные землетрясения с магнитудой > 6 , которые произошли в период 2010–2013 гг. Из рисунка 3 видно, что эпицентры очагов крупных землетрясений коррелируют с расположением зон

резких изменений вертикального градиента силы тяжести.

На рисунке 4 представлены значения гравитационного градиента (Z -компонента) для региона Северного Тянь-Шаня, нанесенные на сетку долгота-широта.

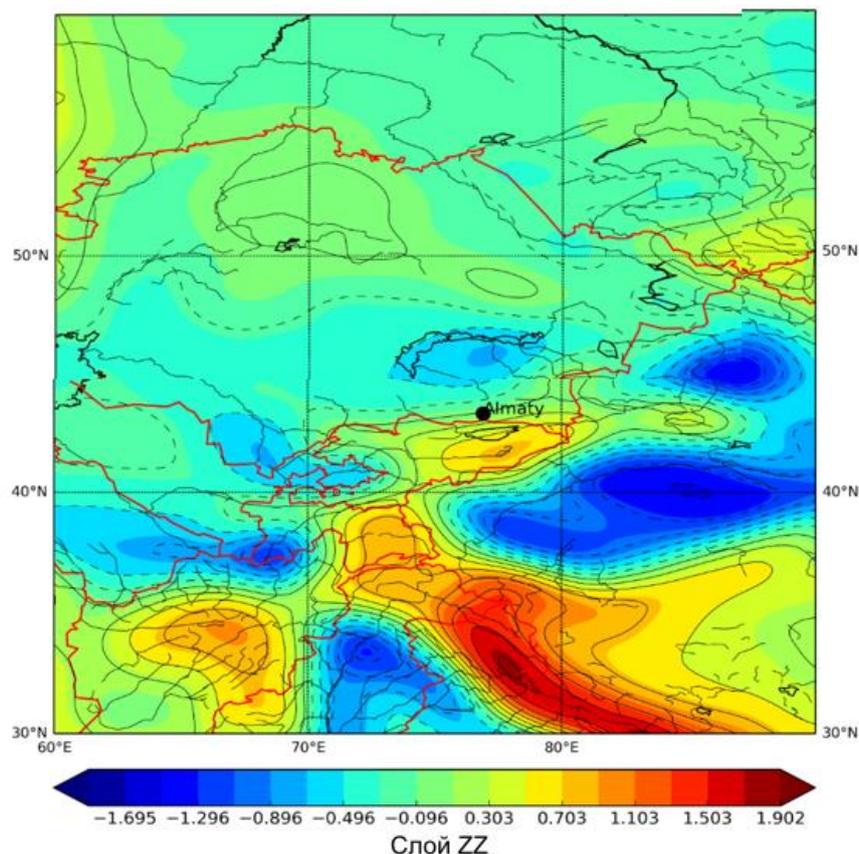


Рисунок 4. Вертикальный гравитационный градиент для региона Северного Тянь-Шаня

Значения вертикального гравитационного градиента получены путем сопоставления данных GOCE/GRACE (Level 2) и модели GOCO03 (http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime). Полученные данные отражают модель геоида.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Спутниковые гравитационные данные применены для исследования земной коры сейсмоактивных регионов. В результате обработки гравиметрических данных со спутников GOSE и GRACE получена глобальная гравиметрическая карта вертикального градиента силы тяжести и гравиметрическая карта для региона Северного Тянь-Шаня. Установлено, что эпицентры очагов крупных землетрясений коррелируют с расположением зон резких изменений вертикального градиента силы тяжести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хаин, В.Е. Гравитационные эффекты перед сильными удаленными землетрясениями / В.Е. Хаин, Э.Н. Халилов // Вестник Международной академии наук (русская секция). Серия физико-технические, химические, точные науки. – 2007. – № 2. – С. 45–52.
2. Zhu, Y. Development and prospect of mobile gravity monitoring and earthquake forecasting in recent ten years in China / Yi. Zhu, F. Liu, G. Zhang, Yu. Xu // Geodesy and Geodynamics. – 2019. – № 10. – С. 485–491.
3. Zhang, G. Gravity changes and crustal deformations before the Menyuan, Qinghai M_s 6.4 earthquake of 2016 Shusong Guo / G. Zhang, Yi. Zhu // Geodesy and Geodynamics. – 2019. – 10. – P. 315–320.
4. ESA's GOCE homepage [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.esa.int/esalp/esayek1vmoc_lpgoce_0.html, свободный.
5. Steiger, C. Flight operations for GOCE, ESA's gravity mission / C. Steiger [et al] // Proceedings of ESA Living Planet Symposium, Bergen, Norway, 28 June – 2 July 2010. – European Space Agency, 2010. – ISBN 978-92-9221- 250-6.

ВЫВОДЫ

Использование спутниковых гравитационных данных является перспективным направлением наземно-космического мониторинга динамических и квазистатических процессов в очаговых зонах землетрясений. Спутниковые гравитационные данные предоставляют эффективный и экономичный способ картировать гравитационное поле Земли с высокой точностью, позволяющей выявлять гравитационные аномалии в зонах сейсмической активности.

Работа выполнена в рамках проекта 0118PK00799 целевой программы BR05336383 АКК МЦРИАП РК.

6. European Space Agency, "Introducing the "Living Planet" Programme: The ESA Strategy for Earth Observation". SP-1234. – May 1999. – Available: <http://esamultimedia.esa.int/docs/SP-1234.pdf>. [Accessed: May 17, 2011].
7. GRACE mission home page [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www2.csr.utexas.edu/grace/>, свободный.
8. Prolific Earth Gravity Satellites End Science Mission. NASA/JPL [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/grace#cite>, свободный.
9. Уласович, К. Спутники GRACE прекратят изучение гравитационного поля Земли [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://nplus1.ru/news/2017/10/28/grace-mission>, свободный.
10. Re-Entry: GRACE-2 – Spaceflight101 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://spaceflight101.com/re-entry/re-entry-grace-2/>, свободный.
11. Re-Entry: GRACE 1 – Spaceflight101 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://spaceflight101.com/re-entry/re-entry-grace-1/>, свободный.
12. Михайлов, В.О. Крупномасштабный сейсмический кризис в областях сильных землетрясений по данным спутников ГРЕЙС о временных вариациях гравитационного поля / В.О. Михайлов, М. Диаман, А.А. Любушин, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов // Физика земли. – 2016. – № 5. – С. 70–81. DOI: 10.7868/S0002333716040050.
13. Iridium buys eighth Falcon 9 launch, shares with Earth science mission. Space News (31 January 2017) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://spacenews.com/iridium-buys-eighth-falcon-9-launch-shares-with-earth-science-mission/>, свободный.
14. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gracefo.jpl.nasa.gov/news/143/grace-fo-first-science-data-now-available/>, свободный.
15. Measuring Earth's Surface Mass and Water Changes [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gracefo.jpl.nasa.gov>, свободный.
16. Mayer-Gürr, T. The new combined satellite only model GOCO03s / T.Mayer-Gürr [et al.] // Presented at the International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems, Venice, Italy. – 2012.
17. Bouman, J. Satellite gravity gradient grids for geophysics / J. Bouman, J.Ebbing, M.Fuchs, J.Sebera [et al.] // Scientific Reports | 6:21050 | DOI: 10.1038/srep21050.

ЖЕРСЕРІКТІК ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ ДЕРЕКТЕРДІ ӨНДЕУ НЕГІЗІНДЕ СЕЙСМИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІ АЙМАҚТАРДЫҢ МОНИТОРИНГІ

А.С. Ким, Ю.Г. Литвинов, А.Б. Андреев, В.И. Капытин

Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығының Ионосфера институты», Алматы, Қазақстан

Гравиметриялық деректерді өңдеу нәтижелері бойынша GOSE және GRACE жерсеріктердің ауырлық күшінің тік градиентінің жаһандық гравиметриялық картасы және Солтүстік Тянь-Шань аймағы үшін гравиметриялық карта алынды. Жерсеріктің биіктігінде ауырлық күшінің тік градиентін құру кезінде еуропалық ғарыш агенттігінің сайтынан гравитациялық градиенттің деректері пайдаланылды. Гравитациялық градиент мәліметтерінің ұсынылған форматтары екі негізгі файлдар жиынтығымен берілген: гравитациялық градиенттер градиентометрді есептеу жүйесінде (GRF) және градиенттерді есептеу жүйесінде жер үсті есептеу жүйесіне (TRF) қатысты бұрылатын, атап айтқанда, Солтүстік есептеу жүйесінде (LNOF) сфералық жергілікті бағытталған. Гравитациялық градиенттің градиенттері 225 км және эллипсоидтің үстінен 255 км-ге орбитаның бойымен GRACE-GOCE гравитация градиенттерінің кіріс деректері ретінде есептелген. Жерсеріктік гравитациялық деректер сейсмикалық белсенді аймақтарды талдау үшін қолданылған. Зерттеу нәтижесінде ірі жер сілкінулер ошақтарының эпицентрлері ауырлық күшінің тік градиентінің күрт өзгеру аймақтарын орналастыра отырып, корреляцияланады.

MONITORING OF SEISMOACTIVE ZONES BASED ON PROCESSING OF SATELLITE GRAVITATIONAL DATA

A.S. Kim, Yu.G. Litvinov, A.B. Andreyev, V.I. Kaputin

Institute of Ionosphere of National Center for Space Research and Technology, Almaty, Kazakhstan

As a result of the processing of gravimetric data from the GOSE and GRACE satellites, a global gravimetric map of the vertical gradient of gravity and a gravimetric map for the Northern Tien Shan region were obtained. In constructing the vertical gradient of gravity at the height of the satellite, the data of the gravitational gradient from the website of the European Space Agency were used. The provided gravitational gradient data formats are defined by two main subsets of files: a subset of gravitational gradients in the gradiometer reference system (GRF) and a subset of gradients in the reference system that rotates relatively to the ground reference system (TRF), in particular, in a spherical locally north-oriented reference system (LNOF). The gradients of the gravitational gradient 225 km and 255 km above the ellipsoid were calculated using GRACE-GOCE gravity gradients along the orbit as input. Satellite gravity data are used to analyze seismically active zones. As a result of studies, it was found that the epicenters of the centers of large earthquakes correlate with the location of the zones of sharp changes in the vertical gradient of gravity.