

DOI 10.53364/24138614_2021_21_2_69

УДК: 528.85; 550.34

Литвинов Ю.Г.

Академия гражданской авиации, г.Алматы, РК.

E-mail: Yurii-Litvinov@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН ПО СПУТНИКОВЫМ
ДАНЫМ
СПУТНИКТІК ДЕРЕКТЕР БОЙЫНША СЕЙСМИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІ
АЙМАҚТАРДЫ ЗЕРТТЕУ
INVESTIGATION OF SEISMICALLY ACTIVE ZONES USING SATELLITE
DATA**

Аннотация. Спутниковые гравитационные данные применены для анализа сейсмоактивных зон. 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.

Область применения: геодинамика, сейсмология, геофизика.

Ключевые слова: спутниковые гравитационные данные, земная кора, очаговые зоны землетрясения, градиенты силы тяжести.

Аңдатпа. Спутниктік гравитациялық деректер сейсмикалық белсенді аймақтарды талдау үшін қолданылады. Gose және GRACE спутниктерінен гравиметриялық деректерді өңдеу нәтижесінде ауырлық күшінің тік градиентінің жаһандық гравиметриялық картасы және Солтүстік Тянь-Шань аймағы үшін гравиметриялық карта алынды. Ірі жер сілкінісі ошақтарының эпицентрлері ауырлық күшінің тік градиентінің күрт өзгеру аймақтарының орналасуымен байланысты екендігі анықталды.

Қолдану саласы: геодинамика, сейсмология, геофизика.

Түйін сөздер: спутниктік гравитациялық деректер, жер қыртысы, жер сілкінісінің ошақтық аймақтары, ауырлық күшінің градиенттері.

Abstract. Satellite gravity data is used for the analysis of seismically active zones. As a result of processing gravimetric data from the GOSE and GRACE satellites, a global gravimetric map of the vertical gravity gradient and a gravimetric map for the Northern Tien Shan region were obtained. It is established that the epicenters of the foci of large earthquakes correlate with the location of zones of sharp changes in the vertical gravity gradient.

Scope of application: geodynamics, seismology, geophysics.

Keywords: satellite gravity data, Earth's crust, earthquake focal zones, gravity gradients.

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 также лежит 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 связано с 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.

После землетрясения магнитудой 7.2 в Синтае в 1966 году в Китае для прогноза землетрясений начали проводить сейсмологический гравитационный мониторинг. Когда в 1976 году произошло Тянь-шаньское 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 на рисунке 1. Перед Вэньчуаньским землетрясением, которое произошло 12-го мая 2008 года, 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.

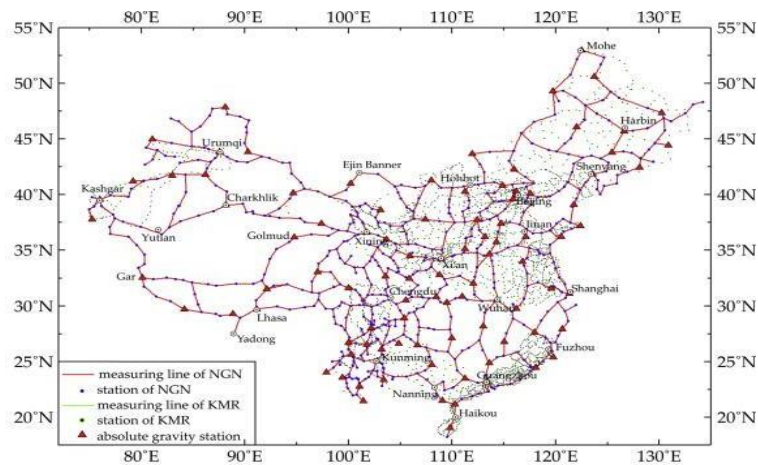


Рисунок 1 – Распределение сети мониторинга сейсмической гравитации в материковом Китае.

Влияние деформаций, происходящих внутри Земли, на изменения силы тяжести на ее поверхности вблизи очагов землетрясений приведено в работе [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. 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 Ms6.4 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, интенсивно проходит вдоль северного края разлома Циляншан. Деформация экстрезии, скорость поверхностного сжатия и изменения силы тяжести были очевидны вблизи эпицентра землетрясения 2016 года в Менюане.

Применение спутниковых гравитационных данных в исследованиях динамических и квазистатических процессов в очаговых зонах землетрясений

Научно-исследовательский спутник GOCE

17 марта 2009 года был 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. 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 с наклоном 96,70°. 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 ноября 2013 года.

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/с² 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 со спутника GOCE нашли многочисленные применения, в том числе при изучении опасных вулканических регионов и прояснении поведения океана.

К сентябрю 2009 года 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 затем выполнялась Средством обработки высокого уровня (HPF), работающим 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 года 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 года в Мюнхенском техническом университете состоялось четвёртое международное рабочее совещание пользователей данных GOCE (4th International GOCE User Workshop). Там был анонсирован ряд моделей гравитационного поля Земли второго поколения.

На рисунке 2 представлена первая глобальная гравитационная модель, основанная на спутниковых данных GOCE.

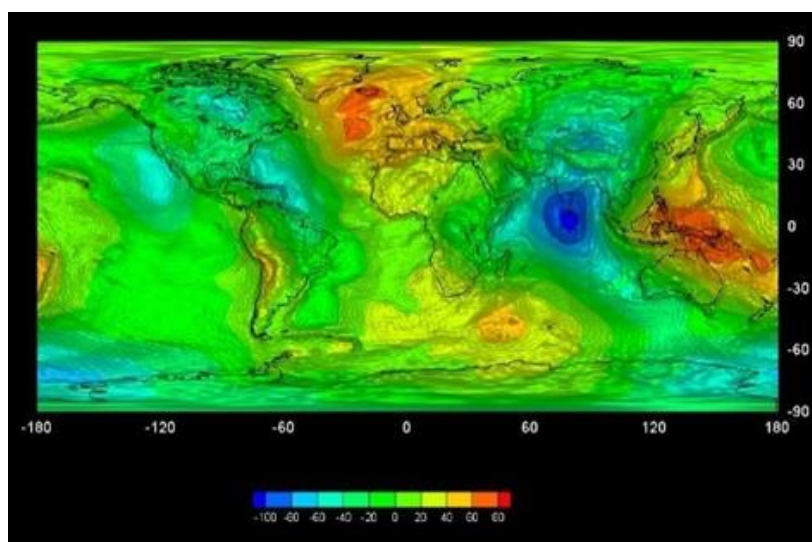


Рисунок 2 – Первая глобальная гравитационная модель, основанная на спутниковых данных GOCE

Из-за исключительно низкого уровня солнечной активности в первой половине 2009 года 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 по 30-11-2009. Этот и более поздние наборы данных GOCE (до 30-11-2010) доступны через виртуальный онлайн-архив GOCE (VOA)

Спутниковая гравиметрия миссии GRACE

Продолжением и развитием исследований, начатых миссией CHAMP, стала

реализация совместного германо-американского проекта GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) [7], в рамках которой 17 марта 2002 года также с космодрома Плесецк были запущены два спутника GRACE-1 и GRACE-2 типа CHAMP. Запуск их был осуществлен на близкие почти круговые близполярные ($i = 89^\circ$) орбиты с номинальной высотой 485 км, при этом расстояние между спутниками изменялся в пределах от 170 до 270 км. Каждый из этих спутников был оснащен следующей бортовой аппаратурой:

□ Двухчастотным (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 микрона в секунду;

□ 24-х канальным двухчастотным GPS-приемником; Высокоточным 3-х компонентным акселерометром;

□ Звездной видеокамерой, позволявшей определять ориентацию основных осей спутника среди звезд с ошибкой не хуже 10 дуговых секунд;

Спутники непрерывно обменивались радиосигналами в микроволновом диапазоне, что позволяла с микронной точностью отслеживать изменения расстояния между ними. Спутники пролетали над каждым участком Земли приблизительно раз в месяц, что позволяло проследить естественные перемещения.

В проекте была реализована комбинация двух вариантов межспутникового слежения (LL SST + HL SST) как между низкими, так и низкими и высокими ИСЗ. Полученные результаты были использованы для оперативного определения параметров геопотенциала в среднем и высоком диапазонах частот. По данным GRACE была построена наиболее точная на данный момент карта глобального гравитационного поля Земли. В октябре 2017 года было принято решение о завершении научной миссии GRACE в связи с износом спутников [8-9].

Спутник GRACE-2 вошёл в атмосферу 24 декабря 2017 года [10]. Спутник GRACE-1 вошёл в атмосферу 10 марта 2018 года [11].

Первый набор наблюдений ежемесячных изменений гравитационного поля Земли был предоставлен миссией-спутником GRACE-1, начавшейся в марте 2002 года. Осенью 2012 года, после более чем 10-летней успешной работы на орбите, американо-германская миссия GRACE-1 продемонстрировала свою выдающуюся способность мониторить массовые движения в системе Земля с беспрецедентной точностью и временным разрешением.

Повышение точности и разрешающей способности ежемесячных моделей глобального гравитационного поля спутников ГРЕЙС, 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 косейсмический скачок гравитационного поля, за которым следовали длительные постсейсмические изменения, достигавшие почти такой же амплитуды. Косейсмические 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 косейсмического 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, вызванного изменениями массы из космоса, предоставляет уникальную возможность для продвижения исследований по изучению массового распределения и улучшению нашего понимания планеты Земля. Результаты миссии GRACE произвели революцию в области исследований гравитационного поля Земли и установили необходимость будущих спутниковых гравитационных миссий [13].

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

22 мая 2018 года 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 продолжит 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 ежемесячные глобальные модели гравитационного поля Земли с высоким разрешением миссии GRACE-1 в течение ожидаемой продолжительности 5 лет.

Гравитационные градиенты по спутниковым данным

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 [16-17]. 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 показывают хорошую согласованность ошибок. Для комбинированных градиентов градиенты модели и наблюдения GOCE должны быть отфильтрованы вдоль трассы.

После выполнения фильтрации наблюдений градиента гравитации для наблюдений может быть установлен полный тензор градиента гравитации, где менее точные компоненты (V_{xu} и V_{yz}) установлены на ноль и заменены чистой информацией о модели.

Процедура расчета представлена на рисунке 3 со следующими шагами:

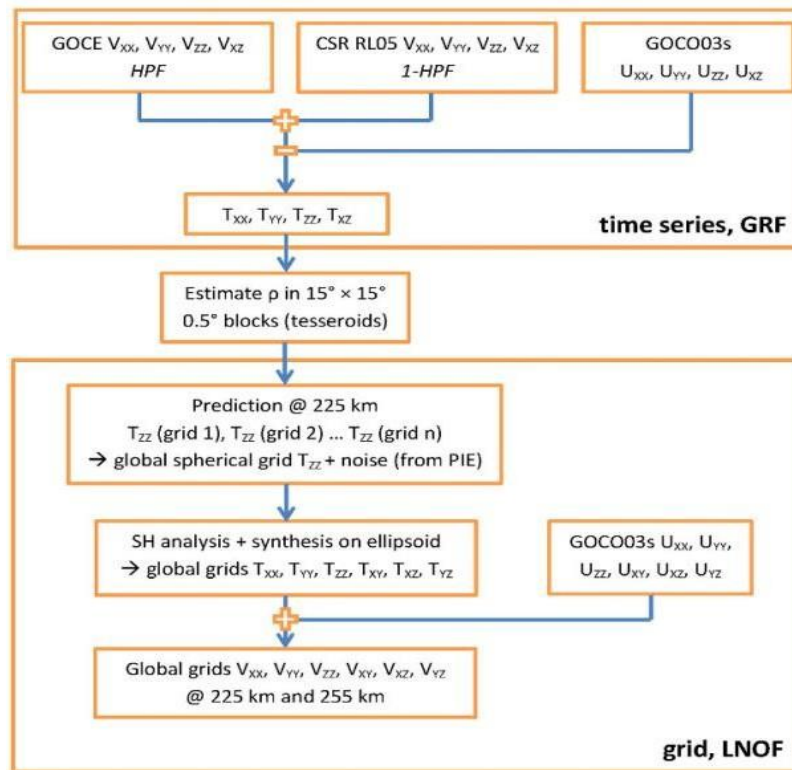


Рисунок 3 – Блок-схема вычислительной процедуры для достижения гравитационных градиентных сеток.

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 в $0,5^\circ$ для тессероидов из TXX, TYY, TZZ и TXZ.

4. Прогнозируются TZZ 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).

На рисунке 4 представлена спектральная плотность оцененных VXX и VXZ погрешностей гравитационного градиента вдоль трассы в течение 10 дней.

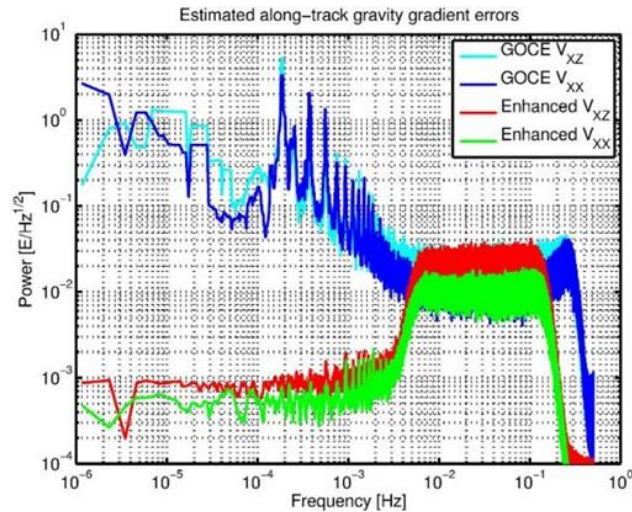


Рисунок 4 – Спектральная плотность оцененных V_{XX} и V_{XZ} погрешностей гравитационного градиента вдоль трассы в течение 10 дней

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 отчета градиентометра (GRF) а затем градиенты измерялись в системе отчета, поворачивающейся относительно наземной системы отчета (TRF), в частности в сферической локально ориентированной на север системе отчета (LNof). Градиенты гравитационного градиента на 225 км и 255 км над эллипсоидом были рассчитаны с использованием в качестве входных данных градиентов гравитации GRACE-GOCE вдоль орбиты. Формат сетки ниже. В каждом ряду у нас есть долгота и широта в градусах, а затем V_{XX} , V_{XY} , V_{YZ} , V_{ZZ} , V_{YZ} , V_{YY} в E (Eötvös, $1 E = 10^{-9} s^{-2}$). Высота над эллипсоидом указывается в имени файла. Данные от номинальной миссии были использованы для расчета сеток на 255 км, данные от расширенной пропущенной фазы были использованы для расчета сеток на 225 км.

На рисунке 5 построен 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 с 2010-2013 гг.

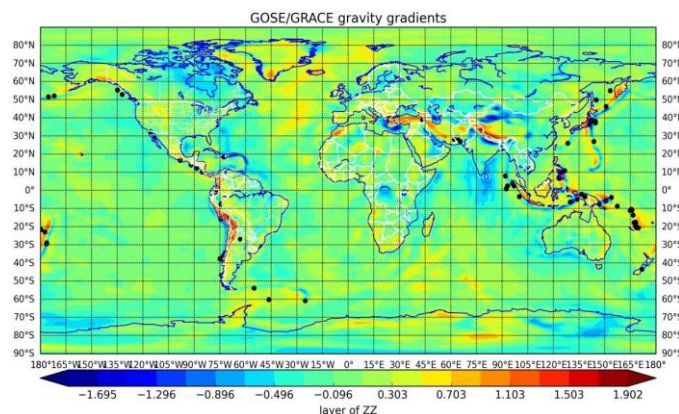


Рисунок 5 – Вертикальный градиент силы тяжести с эпицентрами крупных землетрясений.

Из рисунка 5 видно, что эпицентры очагов крупных землетрясений коррелируют с расположением зон резких изменений вертикального градиента силы тяжести.

На рисунке 6 представлены значения гравитационного градиента (Z компонента) для региона Северного Тянь-Шаня, нанесенные на сетку долгота-широта.

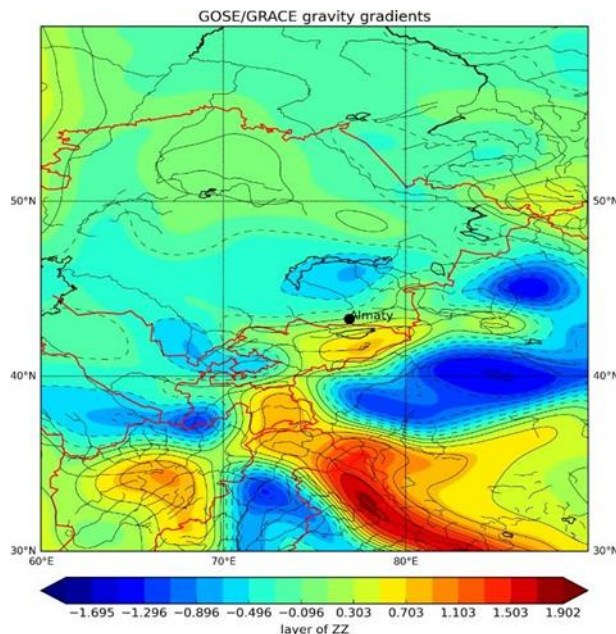


Рисунок 6 – Вертикальный гравитационный градиент для региона Северного Тянь-Шаня

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

Впервые в Казахстане 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.

Работа выполнена по проекту РН 0118PK00799 в рамках целевой научно-технической программы О.0799.

Заключение

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.

Список использованной литературы

1. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Гравитационные эффекты перед сильными удаленными

землетрясениями // Вестник Международной академии наук (русская секция). Серия физико-технические, химические, точные науки. - 2007. - № 2. - С. 45-52.

2. Ицин Чжу, Фан Лю, Гоцин Чжан, Юнма Сюй. Развитие и перспективы мобильного гравитационного мониторинга и прогнозирования землетрясений в последние десять лет в Китае // Геодезия и геодинамика. - 2019. - № 10. - С. 485-491.

2. Ицин Чжу, Фан Лю, Гоцин Чжан, Юнма Сюй. Развитие и перспективы мобильного гравитационного мониторинга и прогнозирования землетрясений в последние десять лет в Китае // Геодезия и геодинамика. - 2019. - № 10. - С. 485-491.

3. Гоцин Чжан, Ицин Чжу. Изменения силы тяжести и деформации земной коры до землетрясения Мэньюань, Цинхай Ms6. 4 2016 года Шусонг Го // Геодезия и геодинамика 10 (2019) 315-320.

3. Гоцин Чжан, Ицин Чжу. Изменения силы тяжести и деформации земной коры до землетрясения Мэньюань, Цинхай Ms6.4 2016 года Шусонг Го // Геодезия и геодинамика 10 (2019) 315-320.

4. С. Штайгер, Р. Флобергаген, М. Ферингер, Дж. Пинеиро, П. П. Эмануэлли, Полетные операции для GOCE, гравитационная миссия ЕКА//Материалы Симпозиума ЕКА по живой планете, Берген, Норвегия, 28 июня – 2 июля 2010 года. Европейское космическое агентство 2010. ISBN 978-92-9221 - 250-6.

5. Европейское космическое агентство, “Представление программы “Живая планета”: Стратегия ЕКА по наблюдению Земли”. SP-1234, май 1999 года. Доступно: <http://esamultimedia.esa.int/docs/SP - 1234.pdf>. [Дата обращения: 17 мая 2011 г.]

6. Домашняя страница миссии БЛАГОДАТИ.

7. Плодовитые Спутники Земной Гравитации Завершают Научную Миссию. НАСА/JPL. <https://ru.wikipedia.org/wiki/grace#cite>.

8. Кристина Уласович. Спутники Грейс прекратят изучение гравитационного поля Земли. <http://nplus1.ru/news/2017/10/28/grace-mission>.

9. Возвращение: ГРЕЙС-2 – Космический полет 101.

10. Возвращение: ГРЕЙС -1 – Космический полет 101.

11. Михайлов В.О., Диаман М., Любушин А.А., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Крупномасштабный асейсмический крип в областях сильных землетрясений по данным спутников ГРЕЙС о временных вариациях гравитационного поля // Физика земли. –2016. - №5.- С. 70–81. DOI: 10.7868/S0002333716040050.

12. Iridium покупает восьмой запуск Falcon 9, совместно с миссией науки о Земле. Космические новости (31 января 2017).

References

1. Hain V.E., Halilov E.N. Gravitationnyye efekty pered silnymi udalennymi zemleträseningami // Vestnik Mejdunarodnoi akademii nauk (russkaia seksia). Seria fiziko-texnicheskie, himicheskie, tochnye nauki. - 2007. - № 2. - S. 45-52.

2. İsin Chju, Fan Lü, Gosin Chjan, İunma Süi. Razvitie i perspektivy mobilnogo gravitasionnogo monitoriņa i prognozirovania zemleträseni v poslednie desät let v Kitae // Geodezia i geodinamika. - 2019. - № 10. - S. 485-491.

2. İsin Chju, Fan Lü, Gosin Chjan, İunma Süi. Razvitie i perspektivy mobilnogo gravitasionnogo monitoriņa i prognozirovania zemleträseni v poslednie desät let v Kitae // Geodezia i geodinamika. - 2019. - № 10. - S. 485-491.

3. Gosin Chjan, İsin Chju. İzmenenia sily täjesti i deformatsii zemnoi kory do zemleträsenia Menüän, Sinhai Ms6. 4 2016 goda Şusong Go // Geodezia i geodinamika 10 (2019) 315-320.

3. Gosin Chjan, İsin Chju. İzmenenia sily täjesti i deformatsii zemnoi kory do zemleträsenia Menüän, Sinhai Ms6.4 2016 goda Şusong Go // Geodezia i geodinamika 10 (2019) 315-320.