УДК 550.831

# АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ Над северо-восточным сектором тихоокеанского региона по данным спутниковой миссии грейс

И.В. Лыгин<sup>1</sup>, Н.С. Ткаченко<sup>1</sup>, Л.В. Зотов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова. 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail:ivanlygin@mail.ru, e-mail: kostinans@mail.ru

<sup>2</sup> Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга. 117991, Россия, г. Москва, Университетский пр-т, д. 13; e-mail: wolftempus@gmail.com

**Аннотация.** На основе анализа материалов спутниковой мониторинговой гравиметрической миссии ГРЕЙС, обработанных по методу многоканального сингулярного спектрального анализа, разработана методика частотного анализа трехмерного распределения аномалий гравитационного поля. По результатам применения методики к гравитационным аномалиям северо-восточного сектора Тихого океана выделены две области наиболее интенсивных низкочастотных вариаций гравитационного поля, плотностные источники которых могут быть обусловлены неотектоническим пересраспределением масс в восточном окончании Алеутской дуги и центральной зоне разлома Сан-Андреас.

Ключевые слова. ГРЕЙС, гравиразведка, вариации гравитационного поля, Тихий океан, Аляска, разлом Сан-Андреас, субдукция.

## ANALYSIS OF THE GRAVITY VARIATIONS ABOVE THE NORTH-EASTERN PART of Pacific Ocean region by the grace satellite mission

I.V. Lygin<sup>1</sup>, N.S.Tkachenko<sup>1</sup>, L.V. Zotov<sup>1, 2</sup>

2

**Abstract.** The method of frequency analysis of the three-dimensional distribution of gravitational field anomalies is developed based on the analysis of the materials of the satellite gravimetric monitoring mission GRACE processed by the method of multichannel singular spectral analysis. According to the results of the application of the technique to the gravitational anomalies of the North-Eastern sector of the Pacific Ocean, two areas of the most intense low-frequency variations of the gravitational field are identified. The density sources of area can be due to the neotectonic redistribution of masses in the Eastern end of the Aleutian arc and the Central zone of the San Andreas Fault.

Key words. GRACE, gravity, variations of the gravitational field, Pacific Ocean, Alyaska, San Andreas Fault, subduction.

ВВЕДЕНИЕ. Более чем пятнадцатилетняя работа одной из наиболее успешных гравиметрических спутниковых миссий ГРЕЙС (GRACE) [Bettadpur, 2012] позволяет рассматривать задачи по изучению долговременных изменений гравитационного поля над крупными геодинамически активными регионами Земли, такими как зоны субдукции, активного орогенеза и рифтинга и др., в которых протекают процессы, связанные с плотностным перераспределением вещества [Ткаченко и др., 2017]. Успешно решаются задачи по анализу косейсмических и постсейсмических временных вариаций глобального гравитационного поля в областях катастрофических землетрясений [Михайлов и др., 2014; 2016].

По материалам миссии GRACE, специально обработанным по методу многоканального сингулярного спектрального анализа [Зотов и др., 2015], проанализированы изменения поля силы тяжести северо-восточной области Тихоокеанского региона за период с 2003 по 2015 годы. В окрестности Аляскинско-Калифорнийского участка субдукции выделены долговременные (более 1 года) непериодические изменения вариаций гравитационного поля [Лыгин и др., 2017; Ткаченко, 2017], которые, как полагают авторы, не связаны с сезонными изменениями в приповерхностном слое, а объясняются особенностями современного тектонического режима региона.

### Исходные гравиметрические данные спутниковой миссии GRACE

Спутниковая миссия GRACE проводится совместно NASA и Немецким аэрокосмическим центром. Ее основной задачей является проведение детальных измерений аномалий поля силы тяжести Земли и их изменения за пятилетний период. GRACE была запущена 17 марта 2002 года с космодрома Плесецк. Данная миссия представляет собой два спутника, которые вращаются на полярной орбите на высоте примерно 500 км над Землей. Принцип работы спутниковой миссии таков: два спутника находятся на расстоянии 220 км друг от друга . На спутниках установлены микроволновые дальномеры с очень высокой точностью измерений. Используя систему GPS и дальномеры, происходит постоянное измерение расстояния между спутниками. Также происходит постоянное измерение всех негравитационных сил на обоих спутниках, чтобы избежать погрешностей. Поскольку расстояние между спутниками достаточно велико, то они реагируют на существующие вариации гравитационного поля, по-разному притягиваясь к Земле. Там, где сила тяжести действует сильнее, спутник будет ближе к поверхности, что сразу улавливает второй спутник.

GRACE является первой в истории миссией, измерения которой проводятся вне зависимости от электромагнитных волн, проходящих через поверхность или атмосферу Земли. В отличие от всех предыдущий миссий, с огромной точностью измеряются расстояния и скорости между двумя спутниками и на основании этих измерений делаются выводы о гравитационных аномалиях в той или иной местности. При этом, измерения проводятся с точностью до 10 микрометров.

Спутники GRACE пролетают над каждой точкой на Земле примерно раз в месяц, что позволяет им определять месячные вариации поля силы тяжести. Когда первый спутник проходит область с чуть большей слой притяжения, нежели та, над которой пролетает второй, он (под действием силы тяжести) немного опускается вниз. Очевидно, что расстояние между ними в этот момент увеличивается. Когда первый спутник проходит данную аномалию, он возвращается на прежнее расстояние от второго. На основании этих измерений строятся карты гравитационных аномалий и модели геоида.

С марта 2002 года по ноябрь 2017 года выполнялась спутниковая миссия GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment), основными задачами которой являлись построение глобальной модели гравитационного поля Земли и регистрация изменения гравитационного поля во времени [Bettadpur, 2012].

Благодаря использованию высокоточной аппаратуры (микроволновых дальномеров, глобальной системы спутниковой навигации GPS), относительно небольшого расстояния между треками полета спутников (при благоприятных условиях 0,5 градуса) и ежемесячному повторению их орбиты (за один месяц спутники совершали 480 оборотов вокруг Земли по орбите с наклоном около 89 градусов к экватору), ежемесячная модель аномального поля силы тяжести, получаемая на основе данных миссии, вычисляется с погрешностью до сотых долей мкГал и имеет пространственное разрешение 100 км [Tapley et al., 2004].

В качестве исходных данных использованы открытые материалы, обработанные Лабораторией реактивного движения НАСА (Jet Propulsion Laboratory, Калифорния, США) [ 16. Джет, 2019]. Исходные материалы представлены в виде ежемесячных отклонений гравитационного потенциала от усредненной за период с марта 2003 года по май 2015 года модели гравитационного поля Земли. Ежемесячные отклонения гравитационного потенциала представлены в виде ряда разложения по полиномам Лежандра по 180 полным гармоникам с пространственным шагом 1х1 градус [Dahle et al., 2013].

Для корректного использования данных потребовалась дополнительная фильтрация меридиональных высокочастотных шумов, называемых полосами или страйпами. Полосы возникают изза того, что орбитальные и инструментальные погрешности, неизменно присутствующие при любых измерениях, проявляются при разложении гравитационного потенциала по гармоникам в виде коррелированного шума, интенсивность которого сопоставима с амплитудой высокочастотных гармоник [Swenson et al., 2006; Wahr et al, 1998]. Paspaбotaны и применяются различные способы борьбы со страйпами, в первую очередь, использующие низкочастотную фильтрацию сигнала: фильтр Гаусса [Wahr et al., 1998], сглаживающий фильтр [Swenson et al., 2006], оптимальный фильтр [Klees et al., 2008], регуляризирующий фильтр [Kusche, 2007] и другие. Окончательная обработка материалов, положенных в основу работы, выполнена с помощью оригинальной методики многоканального сингулярного спектрального анализа (метод МССА), разработанной специально для подавления страйпов [Зотов и др., 2015].

### Частотный анализ временных вариаций поля силы тяжести

В результате обработки данных спутниковой миссии GRACE по методу MCCA получены временные вариации аномалий поля силы тяжести северовосточного сектора Тихоокеанского региона с дискретностью 1 месяц за период с января 2003 года по декабрь 2015 года. Обработанные материалы представлены в динамических изображениях гравитационного поля во времени, которые, к сожалению, в печатных материалах изобразить невозможно.

Однако удается проследить характер изменения гравитационного поля в исследуемом регионе позволяют материалы, представленные в серии рисунков 1 и 2. На рисунке 1 приведены отклонения аномальных значений поля силы тяжести от среднего значения за весь период наблюдений за каждый нечетный месяц 2007 года. Исходя из характера вариаций гравитационного поля и с учетом тектонических условий региона, выделены шесть характерных областей:

Области I – III характеризуют районы малоамплитудных вариаций гравитационного поля в глубоководной части Тихого океана (область I), на шельфе (область II) и суше (область III).

Области IV – VI занимают переходные районы континент – океан и отличаются более интенсивными вариациями гравитационного поля. В отличие от областей I – III, которые описывают характер изменения поля более обширных районов, положение, размер и форма областей IV – VI выбраны таким образом, чтобы они включали зоны локальных максимальных изменений гравитационного поля.

Внутри каждой области рассчитаны средние значения за каждый месяц за весь рассматриваемый период (рис. 2) и оценены характер и амплитуды вариаций аномалий силы тяжести (табл. 1).



Изменение гравитационного поля в течение 2007 года.

На рисунках изображены отклонения аномальных значений поля силы тяжести от среднего значения для каждого нечетного месяца 2007 года. Сечение изоаномал 1 мкГал. Красными контурами выделены характерные области временных изменений гравитационного поля различной интенсивности. Звездами обозначены эпицентры землетрясений магнитудой 2–6,5 баллов (синие), >6,5 баллов (красные), произошедшие в течение месяца

#### Особенности изменения гравитационного поля

Таблица	1
---------	---

19	Изменения гравитационного поля, мкГал			
Облас	Географическое положение	с периодом более 1 года	с периодом менее 1 года	
Зоны малоамплитудных вариаций гравитационного поля				
Ι	Глубоководная часть Тихого океана	фон не изменяется, <1-2 мкГал	<±0,5	
II	Шельфовая область к югу от Аляскинского	общий тренд на увеличение на +5 мкГал;	±1-2	
	залива	слабовыраженные локальные изменения после 2010 г.		
III	Район долины р. Маккензи и Больших озер	общий тренд на увеличение на +7 мкГал;	±1-1,5	
		слабовыраженные локальные изменения после 2010 г.		
Зоны интенсивных вариаций гравитационного поля в зоне перехода континент – океан				
IV	Калифорнийский залив, Береговой хребет	до 2010 г. слабая динамика на уменьшение (менее 3		
	<ul> <li>– горы Сьерра-Невада – Большой Бассейн</li> </ul>	мкГал);	+152	
	(долины рек Сакраменто и Сан-Хаокин)	2010–14 г.г. – локальный максимум (+5 мкГал);	±1,3-2	
		в 2014 г. – скачкообразное уменьшение фона на 4 мкГал		
V	Межгорье Береговой хребет – Скалистые горы,	до 2010 г. фон не изменяется (±1-2);		
	долина р. Фрейзер	2011–13г.г. – локальный максимум (+4);	$\pm 4$	
		после 2014 – резкое уменьшение (1,5 мкГал/год)		
VI	Район Аляскинского хребта	ярко выраженное уменьшение поля на 20 мкГал на всем		
	-	периоде наблюдений;	$\pm 3 - 4$	
		2011-14 г.г. – локальный максимум (+5 мкГал)		



Осредненные по областям вариации поля силы тяжести.

Цвета графиков соответствуют областям: розовый – I, желтый – II, коричневый – III, зеленый – IV, красный – V, синий – VI

Разделение вариаций гравитационного поля на низкочастотную и высокочастотную составляющие. Информация о характере изменения гравитационного поля на площади исследования фактически представляет куб данных, каждый элемент которого – это фиксированная точка с известным значением аномального поля силы тяжести с обозначением плановых координат и времени наблюдения. По сути, это тот же широко распространенный на практике методический прием анализа кубов в сейсморазведке 3Д. Однако анализ изменения гравиметрических данных во времени определил необходимость поиска собственных решений по частотной фильтрации значений куба данных с использованием стандартных процедур, принятых при анализе данных потенциальных полей. Основной объем расчетов выполнен в программном комплексе Geossoft Oasis Montaj. В результате площадного спектрального анализа вариаций гравитационного поля определена важная особенность в этих данных - наличие двух составляющих: 1) высокочастотной, в которой отражаются явно выраженные гармонические изменения с периодом около 1 года); 2) другой низкочастотной, связанной изменениями средних значений поля, наличием трендовых составляющих, локально распространенных по площади временных аномалий гравитационного поля.

Высокочастотная составляющая весьма ярко проявлена в энергетическом спектре максимумами для периодов аномалий 12, 9 и 5 месяцев (рис. 3, *a*). Высокочастотные периодические вариации распространены по всей площади и на всем интервале наблюдений, поэтому выявление и анализ на их фоне более длительных и менее амплитудных изменений сильно затруднен. Для разделения высокочастотной и низкочастотной составляющих по площади наиболее эффективным является фильтр Баттерворта с центральной длиной среза 14 месяцев и крутизной 32 степени. На рисунке 3, *б* приведены графики исходного поля вариаций и его низкочастотной и высокочастотной компонент в произвольной точке на суше в области VI. Очевидно однозначное разделение низкочастотной и высокочастотной спектральных составляющих поля компонент поля.

Высокочастотная периодическая составляющая вариаций гравитационного поля. Высокочастотные периодические изменения с видимым периодом 1 год наблюдаются по всей площади и на всем интервале наблюдений (рис. 2), но варьируют по амплитуде и фазе в зависимости от пространственного положения и времени.

Амплитуда вариаций зависит от степени выраженности рельефа. Чем более пологий рельеф (предгорные и равнинные области) или более глубоководная акватория, тем амплитуда вариаций высокочастотной составляющей гравитационного поля меньше. Наиболее яркие сезонно зависимые вариации гравитационного поля наблюдаются на суше над Кордильерами и шельфе Аляскинского залива (графики IV – VI на рисунке 2). Знак высокочастотных вариаций меняется при переходе от суши к океану. Так на суше вариации поля в первом полугодии преимущественно отрицательные с максимумами в марте, а во втором полугодии – отрицательные с минимумами в сентябре. В глубоководной части Тихого океана наблюдается обратная картина. Принято связывать





подобные вариации (с периодом не более 12 месяцев) с изменением гидрологического режима (сезонными колебаниями уровня грунтовых вод на суше и годовыми океаническими приливами) [Булычев и др., 2011; Зотов и др., 2015; Soni et al., 2015].

Низкочастотная составляющая вариаций гравитационного поля содержит не только тренд изменения поля во времени (рисунок 4, графики 2 и 3), но и локальные в пространстве и времени аномалии гравитационного поля. Например, для областей IV – VI (рисунок 4) ярко выражена положительная временная гравитационная аномалия, наблюдаемая с января 2011 года по январь 2014 года.

Площадное распространение низкочастотных вариаций для всего изучаемого региона можно проследить на примере изменений гравитационного поля в 2007 году (рис. 5) и значениям поля в январские месяца всех лет рассматриваемого периода (рис. 6).

В глубоководной части Тихого океана (наиболее удаленной от побережья) временные вариации гравитационного поля практически отсутствуют или малоамплитудные (не более ±0,5-1,0 мкГал). По мере приближения к побережью Аляскинского залива амплитуды вариаций увеличиваются. Общей закономерностью является увеличение гравитационного поля со временем (в области II – на +6 мкГал за весь период наблюдений). Наиболее неоднородное поле вариаций с относительно быстрыми и высокоамплитудными изменениями приходится на морские и сухопутные области Северо-Американского побережья Тихого океана (от области IV до области VI). Здесь максимальные амплитуды вариаций достигают 40 мкГал, отмечаются области с устойчивыми трендами на увеличение или уменьшения поля, а также локальными временными аномалиями (табл. 1, рис. 4). По мере продвижения вглубь континента происходит постепенное уменьшение амплитуд низкочастотных вариаций и в области III отмечается только постоянное увеличение поля на 5 мкГал за весь период наблюдений без явно выраженных осложнений.

Площадные временные изменения гравитационного поля можно изобразить не только в виде карт вариаций поля, но и в виде временных разрезов. Изменение во времени низкочастотной компоненты гравитационного поля на профилях вдоль Тихоокеанского побережья и пересекающих области высокоамплитудных вариаций показаны на рисунке 7. По горизонтальным осям отложено расстояние в километрах, по вертикальной оси – время регистрации вариаций. Видно, как временные вариации поля вдоль всего Аляскинско-Калифорнийского побережья за период наблюдений меняют свой знак от положительного к отрицательному.

На разрезы вынесены дневной рельеф вдоль профиля, крупные землетрясения (Мw > 8,0 баллов) и активные вулканы. Очевидно, что активные вулканы и области гравитационных вариаций в зонах IV и VI пространственно взаимосвязаны. Кроме того, в областях IV и VI отмечается изменение характера распределения землетрясений (рис. 5, 6). Отметим, что область VI относится к зоне восточного окончания Алеутской дуги, а область IV - это центральная часть и северное окончание трансформного разлома Сан-Андреас. Временная связь землетрясений и вариаций хорошо проявляется при сопоставлении крупнейших землетрясений (с магнитудой более 8 баллов) и осредненных вариаций гравитационного поля (рис. 4). Изменение характера вариаций гравитационного поля происходит после начала 2010 года и проявлено в пяти из шести областей. В это же время, отмечено, что частота крупнейших землетрясений увеличивается. Если с 2003 по 2010 годы крупнейших землетрясений зарегистрировано только три, то в период с 2010 по 2016 годы – они происходили в два раза чаще.



гис. 4 Осредненные по областям низкочастотные вариации поля силы тяжести. Вертикальные пунктирные линии – моменты наиболее мощных землетрясений магнитудой более 8,2 баллов. Цвета графиков соответствуют областям: розовый – I, желтый – II, голубой – III, зеленый – IV, красный – V, синий – VI



Примеры низкочастотной компоненты вариаций поля силы тяжести. Условные обозначения см. на рис. 1.

## 2.2019 Геофизика



ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Благодаря высокой пространственной разрешающей способности и точности спутниковая гравиметрическая миссия GRACE явилась источником уникальной информации, позволившей поставить и решить задачу анализа характера вариаций поля силы тяжести и их геологической природы. Изучение гравитационных эффектов крупных глубинных геодинамических процессов в настоящее время возможно на принципиально новом уровне благодаря современным методам спутниковых наблюдений, обладающим не только большим радиусом исследования, продолжительностью наблюдений, но и высокой точностью.

Проведенный анализ материалов спутниковой гравиметрической миссии GRACE, с использованием данных, обработанных по методу сингулярного спектрального анализа [Зотов и др., 2015], позволил успешно применить методику частотного анализа трехмерного распределения аномалий гравитационного поля, включающая следующие этапы:

## Геофизика 2.2019



#### Рис. 7

Вариации низкочастотной компоненты гравитационного поля вдоль профилей.

Положение профилей показано на рисунке 5.

Вертикальными пунктирными линиями на разрезе показаны границы областей VI и IV; горизонтальными сплошными линиями – моменты времени крупнейших (Mw > 8) землетрясений мира; красными треугольниками – положение вулканов в окрестности 500 км вдоль профиля 1. Формирование базы данных временных изменений гравитационного поля в виде трехмерного куба, в котором по двум осям отложены пространственные координаты измеренных данных, по третьей – время. В рассматриваемом примере куб данных состоит из 154 слоев – месяцев наблюдений, в каждом слое 98 точек на 140 точек;

2. Частотный анализ полных вариаций поля силы тяжести в каждой точке на изучаемой территории;

3. Выделение гармоник, соответствующих поверхностным – сезонным изменениям, и более длительным;

4. Фильтрация куба данных по оси времен с целью сохранения только низкочастотной составляющей поля силы тяжести, которые могут быть обусловлены глубинным перераспределением масс.

На основе анализа исходного поля определено, что период поверхностных сезонных колебаний аномалий силы тяжести не превышает 12 месяцев, а амплитуда варьирует до 40 мкГал. Такие интенсивные изменения существенно превышают полезный сигнал (т.е характеризующий изменения на глубине). Для удаления сезонной составляющей применен фильтр Баттерворта. В результате получено поле, которое уже имеет непериодический характер, но при этом не стационарно, то есть изменяется во времени. Разница между максимальным и минимальным значением поля за весь период исследования составляет более 20 мкГал. Это значение превышает погрешность спутниковых измерений, которая составляет ±0,005–0,01 мкГал.

На основе проведенного анализа получены важные геолого-тектонические результаты: обнаружены 2 области наиболее быстрых и высокоамплитудных изменений поля силы тяжести во времени.

Первая область – восточное замыкание Алеутской дуги (зона VI), территория Аляскинского хребта: здесь происходит смена режима фронтальной субдукции Тихоокеанской плиты на косую. Аномалия поля силы тяжести над Алясикнским хребтом изометричная в плане (870 х 820 км), с горизонтальным градиентом  $\Delta g$  (в январе 2003 года) равным 0.01 мкГал/км. Поле в этой области меняется во времени от +8.3 до -12,2 мкГал за период наблюдений (с 01,2003 по 12,2015) со средней скоростью до 0,13 мкГал/месяц.

Вторая область – северная часть разлома Сан-Андреас (зона IV). Аномалия гравитационного поля изометрична в плане (770 х 760 км), имеет горизонтальный градиент Δg (в мае 2004 года) 0,005 мкГал/ км. Во времени поле в этой области изменяется от +1,8 до -3,7 мкГал за весь период наблюдений, со средней скоростью изменения поля до 0,04 мкГал/ месяц, практически втрое медленнее, чем на Алеутской дуге.

Обе зоны локализуются в вариациях поля силы тяжести наиболее контрастными изменениями, обусловленными плотностными перераспределениями под земной поверхностью. Области характеризуются повышенной сейсмичностью, вулканической активностью. Наиболее крупные землетрясения (магнитуда более 8 баллов), вызывают наиболее интенсивные изменения плотностного разреза, проявленные в зафиксированных исследованиями временных изменениях гравитационного поля. Что служит подтверждением тектонической природы изучаемых изменений гравитационного поля.

Работа выполнена на инициативной основе и за счет средств грантов РФФИ N 16-05-00753, программы «111» N. B17033 KHP Discipline Innovative Engineering Plan of Modern Geodesy and Geodynamics.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Булычев А.А., Джамалов Р.Г., Сидоров Р.В. Использование спутниковой системы GRACE для мониторинга изменений водных ресурсов // Недропользование XXI. 2011. № 2. С. 24–27.

2. Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Телегина А.А. Изменение гравитационного поля в бассейнах крупных рек России по данным GRACE // Альманах Современной Метрологии. 2015. № 3. С. 142–158.

3. Лыгин И.В., Ткаченко Н.С. Переменное гравитационное поле Аляскинской зоны субдукции // Тезисы на конференции Ломоносовские чтения 2017 года. Секция Геология. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Москва. 2017. С. 1–2. Постоянное расположение на интернет-ресурсе: https://conf.msu.ru/rus/event/4305/

4. Михайлов В.О., Диаман М., Любушин А.А., Тимошкина Е.П. и 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.

 5. Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Ляховский В. и др. Сравнительный анализ временных вариаций глобального гравитационного поля по данным спутников Грейс в областях трех недавних гигантских землетрясений // Физика Земли. 2014. Т. № 2. С. 29–40.
 6. Ткаченко Н.С. Применение спутниковой миссии

6. Ткаченко Н.С. Применение спутниковой миссии GRACE для регистрации геодинамических изменений в районе Аляскинской зоны субдукции // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНО-СОВ-2017» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс]. М.: МАКС Пресс, 2017. 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. ISBN 978-5-317-05504-2. Постоянное расположение на интернет-ресурсе: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov\_2017/ data/10585/uid107442\_report.pdf

7. Ткаченко Н.С., Лыгин И.В. Применение спутниковой миссии GRACE для решения геологических и географических задач // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2017. № 2. С. 3–7.

8. *Bettadpur S.* Level-2 Gravity Field Product User Handbook // Center for Space Res. 2012.

9. *Dahle C. et al.* GFZ GRACE Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0005 // GFZ German Res. Centre for Geosci. 2013.

10. *Klees R. et al.* The design of an optimal filter for monthly GRACE gravity models // Geophys. J. Int. 2008. T. 175. N 2. C. 417–432.

11. *Kusche J.* Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models // J. Geod. 2007. T. 81. № 11. C. 733–749.

12. Soni A., Syed T.H. Diagnosing Land Water Storage Variations in Major Indian River Basins using GRACE observations // Glob. Planet. Change. 2015. T. 133. C. 263–271.

13. Swenson S., Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data // Geophys. Res. Lett. 2006. T. 33. № 8.

14. *Tapley B.D. et al.* The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results: GRACE MIS-SION OVERVIEW AND EARLY RESULTS // Geophys. Res. Lett. 2004. T. 31. № 9. C. n/a-n/a.

15. Wahr J., Molenaar M., Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE // J. Geophys. Res. Solid Earth. 1998. T. 103. № B12. C. 30205–30229.

16. Интернет-ресурсы Джет Пропульшн Лаборатори ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/. Ссылка актуальна на 30 апреля 2019 г.

#### REFERENCE

1. Bulychev AA, Jamalov RG, Sidorov RV. The Use of GRACE satellite system to monitor the changes in water resources. Journal Nedropolzovanie XXI. 2011; (2): 24–27 (in Russian).

2. Zotov LV, Frolova NL, Telegina AA. Change of the gravitational field in the basins of large rivers of Russia according to GRACE. Al'manah Sovremennoj Metrologii. 2015; (3): 142– 158 (in Russian).

3. Lygin IV, Tkachenko NS. Variable gravitational field of the Alaska subduction zone. Abstracts at the Lomonosov readings conference 2017. Section of Geology. Lomonosov M.V. Moscow State University. Moscow. 2017. P. 1–2. Permanent location on the Internet resource: https://conf.msu.ru/rus/ event/4305/ (in Russian).

4. Mikhailov VO, Diament M, Lyubushin AA, Timoshkina EP and Khairetdinov SA. Large-scale aseismic creep in the areas of the strong earthquakes revealed from the grace data on the time variations of the earth's gravity field. Izvestiya – Physics of the Solid Earth. 2016; 52(5): 692–703. DOI: 10.1134/S1069351316040054.

5. Mikhailov VO, Panet I, Hayn M, Timoshkina EP, Bonvalot S, Lyakhovsky V, Diament M and de Viron O. Comparative study of temporal variations in the earth's gravity field using grace gravity models in the regions of three recent giant earthquakes. Izvestiya – Physics of the Solid Earth. 2014; 50 (2): 177–191. DOI: 10.1134/S1069351314020062.

6. *Tkachenko NS*. Application of the GRACE satellite mission to record geodynamic changes in the Alaska subduction zone. Materialy Mezhdunarodnogo molodezhnogo nauchnogo foruma «LOMONOSOV-2017» / Otv. red. I.A. Aleshkovskij, A.V. Andriyanov, E.A. Antipov. [Elektronnyj resurs]. Moscow: MAKS Press, 2017. 1 elektron. opt. disk (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-05504-2. Permanent location on the Internet resource: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov\_2017/ data/10585/uid107442 report.pdf (in Russian).

7. *Tkachenko NS, Lygin IV*. Application of the GRACE Satellite Mission for Solving Geological and Geographic Problems. Moscow University Geology Bulletin. 2017. Vol. 72 No. 3, No. 2, pp. 159–163.

8. *Bettadpur S.* Level-2 Gravity Field Product User Handbook. Center for Space Res. 2012.

9. *Dahle C et al.* GFZ GRACE Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0005. GFZ German Res. Centre for Geosci. 2013.

10. *Klees R et al.* The design of an optimal filter for monthly GRACE gravity models. Geophys. J. Int. 2008; 175(2): 417–432.

11. *Kusche J.* Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models. J. Geod. 2007; 81(11): 733–749.

12. *Soni A, Syed TH*. Diagnosing Land Water Storage Variations in Major Indian River Basins using GRACE observations. Glob. Planet. Change. 2015. T. 133. C. 263–271.

13. Swenson S, Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. Geophys. Res. Lett. 2006. T. 33. № 8.

14. *Tapley BD et al.* The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results: GRACE MISSION OVERVIEW AND EARLY RESULTS. Geophys. Res. Lett. 2004. T. 31. № 9. C. n/a-n/a.

15. *Wahr J, Molenaar M, Bryan F.* Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. J. Geophys. Res. Solid Earth. 1998. T. 103. № B12. C. 30205–30229.

16. Internet resource. Jet Propulsion Laboratory ftp://podaac. jpl.nasa.gov/allData/grace/. The link is valid for April 30, 2019.

Положительная рецензия от Решение редколлегии о публикации от

## ОБ АВТОРАХ



Иван Владимирович Доцент, кандидат геолого-минералогических наук, Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, геологический факуль-

тет, кафедра геофизических мето-

дов исследования земной коры.

ЛЫГИН



#### ТКАЧЕНКО Наталья Сергеевна

Аспирант, Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры.



### ЗОТОВ Леонид Валентинович

Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, лаборатория гравиметрии.