

Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России

Л.В.Зотов, Н.Л.Фролова, С.К.Шам

Гравиметрия — наука с давней историей. Методы гравиметрических измерений совершенствовались на протяжении всего XX в. Но даже самые современные наземные наблюдения (например, с использованием сверхпроводящих гравиметров) не дают полного представления о глобальной и региональной динамике изменений гравитационного поля. Лишь космическая эра открыла путь к полномасштабному исследованию временных вариаций гравитационного поля нашей планеты, в том числе на труднодоступных протяженных территориях, и позволила научному сообществу опереться на глобальные данные в дискуссионных вопросах по климату.

По принципу «ведущий — ведомый»

Технологическим достижением нашей эпохи стали спутники-близнецы GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment — Эксперимент по исследованию гравитационного поля и климата), разработанные Национальным аэрокосмическим агентством США (NASA) и Германским аэрокосмическим центром (DLR) и в марте 2002 г. выведенные на орбиту с северного российского космодрома «Плесецк». Два иден-

© Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Шам С.К., 2016



Леонид Валентинович Зотов, кандидат физико-математических наук, доцент Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», старший научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — вращение Земли, гравитационное поле, климатические изменения.



Наталья Леонидовна Фролова, профессор, доктор географических наук, заведующая кафедрой гидрологии суши географического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Занимается изучением стока рек, дистанционными методами исследования Земли, горной гидрологией.



С.К.Шам (С.К.Шум), профессор отделения геодезии Школы наук о Земле Университета штата Огайо (г.Колумбус, США). Один из авторов отчета IPCC по климату 2007 г. Специалист в области климатических изменений, спутниковой геодезии, геодинамики, исследований системы моря, данных GRACE.

Ключевые слова: гравитационное поле, GRACE, космическая гравиметрия, водные ресурсы.

Key words: gravitational field, GRACE, space gravimetry, water resources.

тичных спутника летят на расстоянии около 200 км друг за другом по одной и той же полярной орбите с наклоном 89° на высоте примерно 500 км над Землей. При прохождении над гравитационными неоднородностями характер их движения меняется: полет спутников «возмущается» гравитационным полем Земли. Ситуацию можно проиллюстрировать так: первый аппарат (ведущий), попав в аномалию, ускоряется, и это увеличивает расстояние между спутниками. Когда же аномалию проходит второй аппарат (ведомый), то ускоряется уже он, и это уменьшает расстояние между близнецами. Расстояние между спутниками непрерывно измеряется в микроволновом диапазоне, что позволяет с микрометровой точностью отслеживать эти отклонения. Их собственное движение и ориентация регистрируются с помощью высокоточных навигационных инструментов — систем глобального позиционирования GPS, акселерометров и звездных датчиков. Регистрируемое расстояние между спутниками и есть та исходная величина, которая содержит информацию о гравитационном поле. За сутки зонды проходят по своей орбите примерно 15 раз (орбитальный период длится 91 мин). Поскольку за это время невозможно густо покрыть измерениями всю поверхность Земли, система выполняет накопление данных за 30-дневный период.

Данные со спутников поступают на обработку в Германский геофизический центр (GFZ, г.Потсдам) и в США — в Центр космических исследований (CSR, г.Остин) и в Лабораторию реактивного движения (JPL, г.Пасадена). С учетом показаний бортовых GPS, акселерометров, звездных камер и другой аппаратуры получают продукт (данные) первого уровня (L1) [3]. Затем, используя сложный алгоритм решения обратной задачи с регуляризацией [12] и учитывая поправки на изменения атмосферного давления над сушей и океаном, величину твердотельного, океанического, полярного приливов, получают данные второго уровня (L2) [2]. Они представляют собой разложение ежемесячного гравитационного поля по сферическим функциям в виде коэффициентов Стокса, названных по имени английского математика Дж.Г.Стокса (1819–1903) [15, 16]. При вычитании среднего поля из ежемесячных коэффициентов Стокса, получаемых с GRACE, можно наблюдать изменения гравитационного поля от месяца к месяцу с точностью до микрогала ($1 \text{ Гал} = 0.01 \text{ м/с}^2$) и пространственным разрешением около 300 км.

Файлы данных уровня L2 находятся на серверах GFZ, CSR и JPL в открытом доступе. Их можно использовать в геофизических, геологических, океанографических и гидрологических исследованиях, в решении задач по вращению Земли, в геодинاميке, сейсмологии и климатологии. Однако необходима фильтрация данных от шумов.

Чтобы убрать лишнее, разложим на составляющие

Для самой большой страны в мире, России, недостаточно покрытой метеорологическими и гидрологическими сетями наблюдений, данные космической гравиметрии особенно полезны. В Государственном астрономическом институте имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова используется новый подход к обработке данных GRACE — многоканальный сингулярный спектральный анализ (МССА), который позволяет устранять меридиональные шумы — страйпы, обусловленные нахождением обоих спутников на полярной орбите и орбитальными резонансами, а также разделять главные компоненты сигнала. По сравнению с другими методами удаления страйпов [5–8, 11] МССА, несмотря на математическую сложность, более гибок, поэтому предпочтение в данном исследовании отдано ему.

Мы использовали многоканальный сингулярный спектральный анализ для обработки гравиметрических данных GRACE Level 2 RL05.1 с января 2003 г. по сентябрь 2015 г. из архива центра обработки JPL. Измерения гравитационного поля со спутника методом МССА разложили по эмпирическим ортогональным функциям, что позволило отфильтровать их и оставить полезный сигнал, связанный с перераспределением вод суши и океана, процессами массопереноса в почве и на больших глубинах. Медленные процессы в литосфере вычли по модели постледникового поднятия Паулосна, 2007 [9]. В результате остались лишь аномалии, т.е. отклонения в гравитационном поле, в основном связанные с климатическими и гидрологическими процессами. Величины аномалий гравитационного поля перевели в эквивалентный уровень воды (ЭУВ), выраженный в сантиметрах (как если бы они были созданы массой плоского слоя воды определенной толщины), и составили карты аномалий гравитационного поля Земли для каждого месяца (рис.1).

Снегонакопление, половодье, мерзлота...

Воспользовавшись базой данных бассейнов рек STN-30p (Simulated Topological Networks)*, мы наложили маску на обработанные данные и выделили 15 крупнейших речных бассейнов России (табл.). Осредненные показатели эквивалентного уровня воды для них представлены на рис.2, 3. Тренд по России возрастающий, что в основном определяется перераспределением водных масс в бассейнах сибирских рек (рис.3). Крупные реки европейской части (Волга, Днепр) в последние 13 лет демонстрируют отрицательный тренд. Зи-

* <http://www.wsag.unh.edu/Stn-30/stn-30.html>

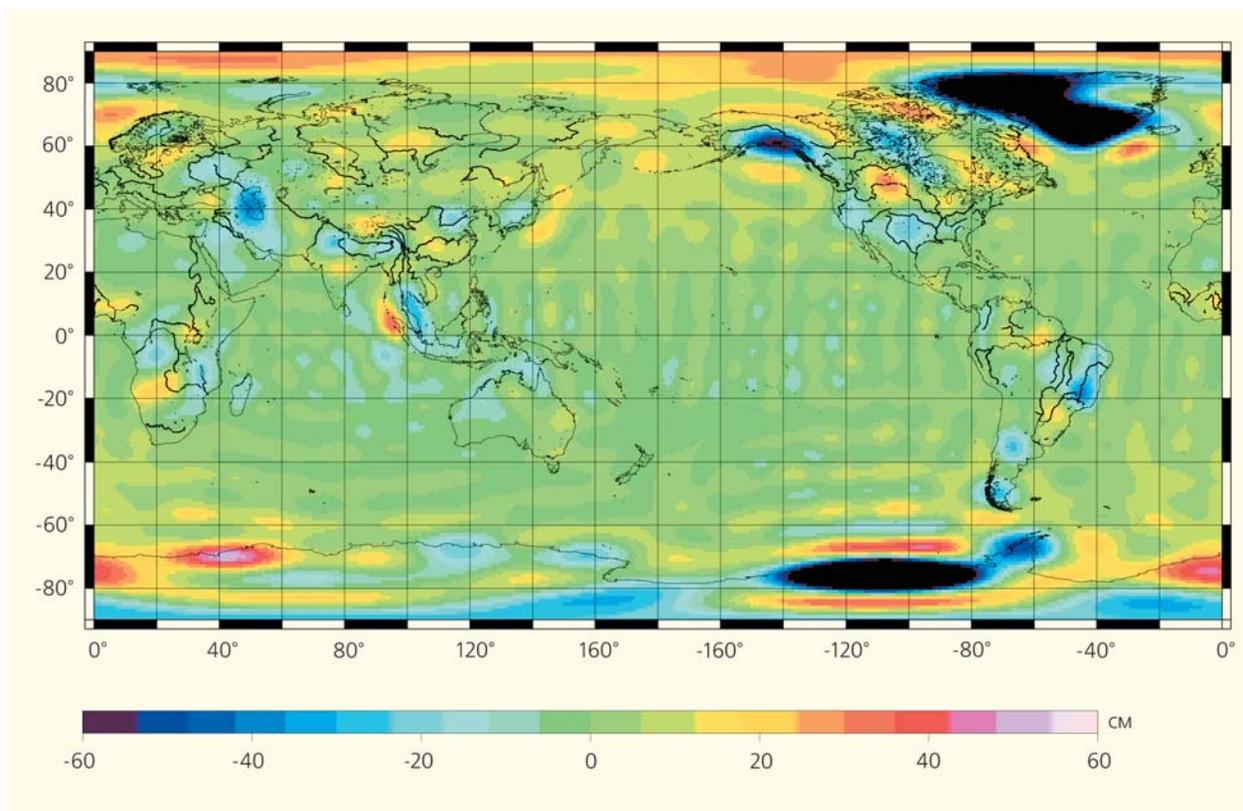


Рис.1. Карта изменений гравитационного поля Земли с 2003 по 2015 гг. по данным GRACE. Шкала ЭУВ (1 см ≈ 0.4 мкГал). Красным отмечены положительные аномалии (избыток массы), синим — отрицательные. Хорошо заметно таяние ледников Гренландии, Антарктиды, Аляски, Гималаев. Положительная аномалия на Амазонке и юге Конго связана с изменением количества осадков, пятно возле о.Суматра (Индонезия) — с землетрясением 2004 г., переместившим крупный (~1000 км) блок земной коры. Полосы над экватором океана — остаточные шумы-страйпы.

Таблица

Сводные данные по 15 бассейнам крупнейших рек России

Название	Длина бассейна, км	Площадь бассейна, км ²
Реки арктического бассейна (азиатская часть)		
Обь	5410	2 990 000
Енисей	4102	2 580 000
Лена	4260	2 490 000
Колыма	2129	647 000
Хатанга	1636	364 000
Индигирка	1790	362 000
Анадырь	1150	191 000
Яна	872	238 000
Оленёк	2270	219 000
Реки арктического бассейна (европейская часть)		
Северная Двина	1332	357 000
Печора	1809	322 000
Реки тихоокеанского бассейна		
Амур	4440	1 856 000
Реки атлантического бассейна		
Волга	3530	1 360 000
Днепр	2201	504 000
Дон	1870	421 700

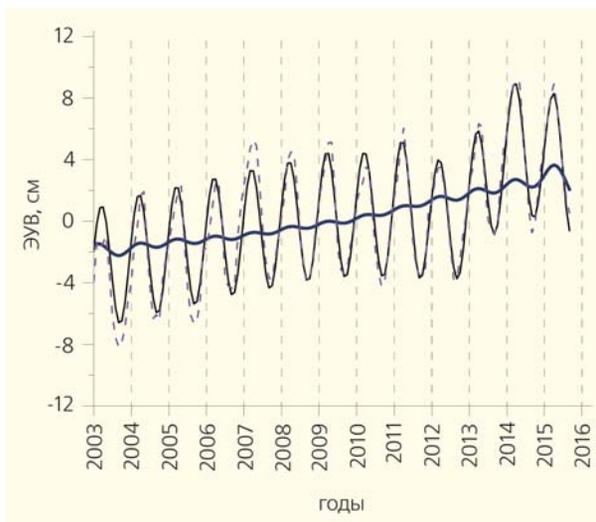


Рис.2. Усредненные показатели аномалий ЭУВ в бассейнах 15 крупнейших рек России: фиолетовая (пунктирная) кривая отражает исходные данные до применения метода МССА, черная — после МССА-сглаживания, синяя — тренд, связанный с перераспределением масс вследствие медленных климатических изменений.

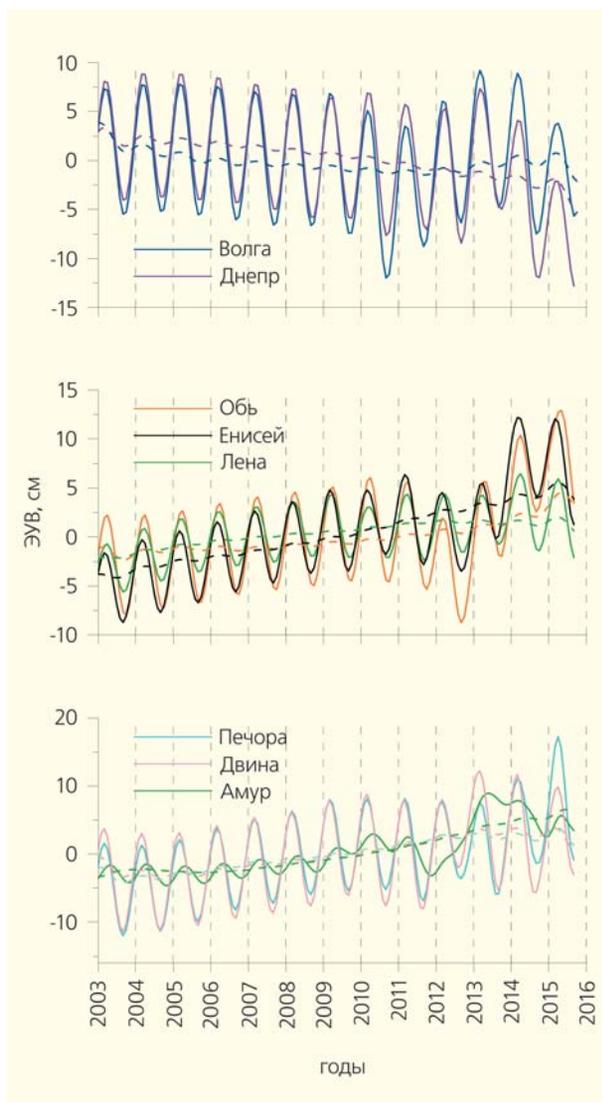


Рис.3. Осредненные гравиметрические данные по аномалиям масс для бассейнов рек европейской части России (вверху), Сибири (в середине), Русского Севера и Дальнего Востока (внизу). Сплошная линия — отфильтрованный МССА суммарный сигнал, пунктирная — тренд. Хорошо заметна аномалия летом 2010 г., связанная с засухой, приведшей к лесным пожарам [1]; также виден аномальный максимум 2013 г. (вверху).

мой при отрицательных температурах, когда большая часть рек нашей страны покрыта льдом, приток подземных вод следует считать постоянным. Следовательно, можно предположить, что увеличение масс, наблюдаемое с GRACE в зимние месяцы, в основном связано со снегонакоплением. Согласно отчету Гидрометцентра России, зимой 2012–2013 гг. количество запасенной в снеге воды было максимальным с 1967 г. Его таяние в апреле–июне вызвало на многих реках Европейской России повышенную волну половодья. В данных GRACE эта аномалия также нашла отражение.

Большую озабоченность в последние годы вызывают засухи и наводнения на крупных озерах, таких как Байкал и Ханка на Дальнем Востоке. Несмотря на относительно малый размер водосборов, все же удастся исследовать их с помощью GRACE. Например, обстановка на оз.Ханка коррелирует с таковой на р.Амур.

Кривая изменения аномалий для Амура (рис.3, внизу) отличается тем, что на фоне небольшой годовой амплитуды в 2012–2013 г. наблюдается быстрый прирост масс. Повышенный влагозапас в бассейне реки в результате весеннего половодья 2013 г. во многом способствовал развитию катастрофических наводнений после выпадения осадков летом и осенью того же года. Предсказывать такие события очень важно, но весьма трудно. Мы делали попытки прогноза кривых рис.3 с использованием нейронной сети [20], однако он не оправдался. Гидрологическая обстановка во многом зависит от метеорологических факторов, которые не поддаются прогнозированию элементарной нейронной сетью или авторегрессией. Особенно затруднено прогнозирование трендов. Тем не менее в работе [10] показано, что привлечение данных GRACE увеличивает предсказуемость половодий на десятки процентов. Исследования в этом направлении идут в Институте водных проблем РАН. Прогнозы влагозапасов могут быть полезны также для оценки урожайности сельскохозяйственных культур.

На графиках рис.3 четко выделяются годовые колебания, амплитуда и фаза которых не одинаковы и определяются сезонным перераспределением водных масс на поверхности, в почвах и др., суммарно регистрируемым GRACE. На кафедре гидрологии географического факультета МГУ эти компоненты с успехом разделяют и сопоставляют с гидрологическими моделями (GLDAS, WGHM, ECOMAG) и данными полевых наблюдений [14, 17, 18].

Полученные после МССА-обработки осредненные гравиметрические данные по аномалиям масс для бассейнов рек Сибири, европейской части России, Русского Севера и Дальнего Востока хорошо согласуются с доступными в Интернете* расчетами для конкретных бассейнов, сделанными французским Национальным центром космических исследований (CNES) в Тулузе. К слову, CNES использует метод коррекции данных GRACE, основанный на отсеке малых сингулярных чисел для получения собственного продукта уровня L2 GRACE RL03 v1. В нашей стране можно было бы создать собственный центр обработки данных и использовать методику, подобную МССА.

Отметим, что реки европейской территории и Сибири различаются по амплитуде сезонных колебаний масс воды и направленности трендов общих влагозапасов. Если для европейских рек

* www.thegraceplotter.com

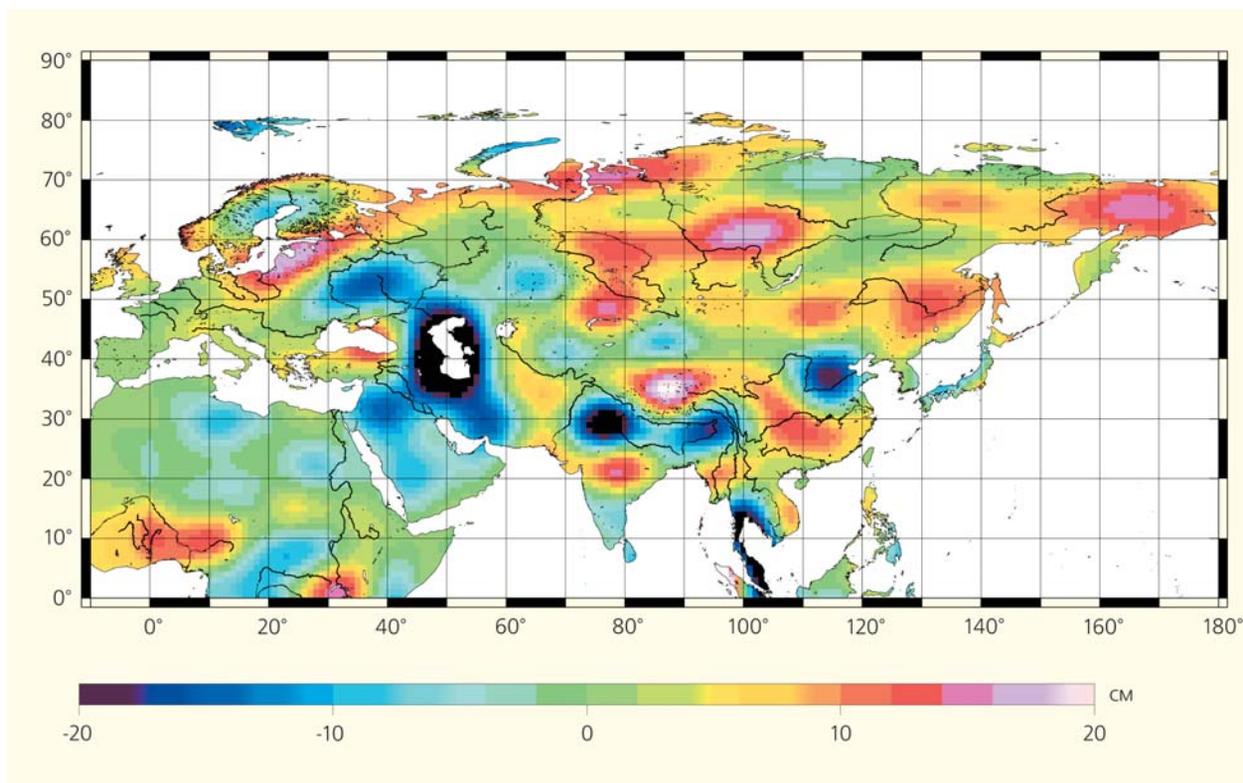


Рис.4. Карта климатологических трендов, отражающая изменения гравитационного поля над Евразией за 13 лет (2003–2015).

(рис.3, сверху) характерны убывающие тренды, то для сибирских (рис.3, в середине) они положительны. Поскольку бассейны рек Сибири велики (табл.), они определяют общие тренды массонакопления на всей территории России. Сток этих рек во многом обуславливает и климат арктического региона. Как известно, Арктика особенно сильно откликается на климатические изменения, поэтому ее изучение, в том числе на основе данных GRACE, чрезвычайно важно.

А теперь обратимся к карте климатологических трендов (рис.4), отражающей изменения гравитационного поля за 13 лет (2003–2015). В Восточной Сибири, у истоков Енисея и Лены, образовалась положительная аномалия, связанная с деградацией вечной мерзлоты и замещением почвенного льда более плотной водой. Таково предположение зарубежных ученых, исследовавших этот регион по данным GRACE [4, 8]. Увеличение суммарной массы в истоках Лены, Тунгуски и Иртыша, заметное на картах GRACE, — безусловно, результат изменений климата. Вдоль берегов Северного Ледовитого океана и на Дальнем Востоке также виден избыток масс. Чтобы понять причины этих изменений, надо провести полевые исследования в этих труднодоступных регионах России. Значительная отрицательная аномалия масс сконцентрирована в районе Каспийского моря. Вероятно, она обусловлена понижением уровня Каспия [13].

Экстремальные аномалии отмечаются и за пределами России. На карте (рис.4) хорошо заметны, например, аномалии в Гималаях, связанные с таянием ледников, и в Восточном Китае, где истощение подземных вод грозит жителям Пекина.

* * *

Спутниковая миссия GRACE стала важным источником получения геофизической информации. На основе ее данных удалось проанализировать многолетние и сезонные изменения характеристик водного баланса крупнейших рек России в условиях меняющегося климата. При этом дистанционная информация хорошо согласуется с данными гидрологических моделей и натурными измерениями величины речного стока для отдельных периодов времени.

Мировое научное сообщество активно использует данные GRACE для изучения последствий глобальных климатических изменений, геофизических процессов в региональном масштабе. Таяние ледников Гренландии и Антарктиды, перераспределения масс океана [19], вносящие вклад в нестационарную (массовую) компоненту глобальных изменений уровня моря, последствия крупнейших землетрясений — все это сказывается на гравитационном поле Земли и допускает количественную оценку по данным GRACE.

Спутники GRACE, рассчитанные на пятилетний срок службы, до сих пор работают на орби-

те. Миссия продлена до 2017 г. К этому времени должна быть запущена следующая подобная — GRACE Follow-On, оснащенная лазерным дальномером и более совершенными приборами, что позволит увеличить точность измерений на два-три порядка. Ее разрабатывают Европейское (ESA), Американское (NASA) и Китайское (CNSA)

космические агентства. России, на территории которой происходит немало интереснейших природных процессов, было бы полезно принять участие в международном проекте. Коллектив авторов, имея опыт применения метода МССА для фильтрации данных GRACE, планирует продолжить исследования. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-05-753).

Литература

1. *Barriopedro D., Fischer E., Luterbacher J. et al.* The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe // *Science*. 2011. V.332. №6026. P.220–224. Doi:10.1126/science.1201224.
2. *Bettadpur S.* Level-2 gravity field product user handbook // 2007. ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/L2-UserHandbook_v2.3.pdf
3. *Case K., Kruizinga G., Wu S.C.* GRACE level 1b data product user handbook // JPL, 2004. ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/Handbook_1B_v1.2.pdf
4. *Frappart F., Papa F., Guntner A. et al.* Interannual variations of the terrestrial water storage in the Lower Ob'Basin from a multisatellite approach. // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2010. V.14. P.2443–2453.
5. *Guo J., Duan X., Shum C.* Non-isotropic filtering and leakage reduction for determining mass changes over land and ocean using GRACE data // *Geophys. J. Int.* 2010. V.181. P.290–302.
6. *Shang K., Guo J., Shum C. et al.* GRACE time-variable gravity field recovery using an improved energy balance approach // *Geophys. J. Int.* 2015. V.203(3). P.1773–1786. Doi:10.1093/gji/ggv392.
7. *Kusche J., Schmidt R., Petrovic S. et al.* Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ and their validation using a hydrological model // *J. of Geodesy*. 2009. V.83. P.903–913.
8. *Landerer F., Dickey J., Zlotnick V.* Terrestrial water budget of the Eurasian pan-Arctic from GRACE satellite measurements during 2003–2009 // *J. of Geophys. Res. (Atmospheres)*. 2010. V.115. Doi:10.1029/2010JD014584.
9. *Paulson A., Zhong S., Wahr J.* Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data // *Geophys. J. Int.* 2007. V.171. P.497–508.
10. *Reager J.T., Thomas B.F., Famiglietti J.S.* River basin flood potential inferred using GRACE gravity observations at several months lead time // *Nature Geosci.* 2014. Doi:10.1038/ngeo2203.
11. *Swenson S., Wahr J.* Post-processing removal of correlated errors in GRACE data // *Geophys. Res. Lett.* 2006. Doi:10.1029/2005GL025285.
12. *Wang Y.F., Yagola A.G., Yang C.C.* Computational methods for applied inverse problems // Beijing, 2012.
13. *Zonn I.S., Glantz M.H., Kostianoy A.G., Kosarev A.N.* The Caspian Sea Encyclopedia. Berlin; L., 2010.
14. *Айбулатов Д., Зотов Л., Фролова Н., Чалов С.* Современные возможности использования методов дистанционного зондирования для получения информации о водных объектах // *Земля из Космоса*. 2015. №S1. С.34–37.
15. *Панелеев В.Л.* Теория фигуры Земли: Курс лекций. Москва, 2000. <http://Infm1.sai.msu.ru/grav/russian/lecture/tfe/index.html>
16. *Сагитов М.У.* Лунная гравиметрия. М., 1979.
17. *Зотов Л., Фролова Н., Григорьев В., Харламов М.* Использование спутниковой системы измерения поля гравитации Земли (GRACE) для оценки водного баланса крупных речных бассейнов // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2015. №4. С.27–33.
18. *Зотов Л., Фролова Н., Телегина А.* Гравитационные изменения в бассейнах крупных рек России // *Альманах современной метрологии*. 2015. Т.3. С.142–158.
19. *Зотов Л.В., Власова В.М.* Вариации придонного давления по данным GRACE // *Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования (КИМП-2016): Сборник трудов конференции*. Севастополь, 2016.
20. *Зотов Л.В.* Теория фильтрации и обработка временных рядов: Курс лекций. Москва, 2010.