



# **НАВИГАЦИЯ ПО ГРАВИТАЦИОННОМУ ПОЛЮ ЗЕМЛИ И ЕЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

**ДОКЛАДЫ  
научно-технической конференции**

*Менделеево,  
14–15 февраля 2017 г.*

**Менделеево – 2017**

## О НЕКОТОРЫХ ДОСТИЖЕНИЯХ МИССИИ GRACE

Л.В. Зотов<sup>1</sup>, Н.Л. Фролова<sup>2</sup>, В.Д. Юшкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МИЭМ НИУ ВШЭ, ГАИШ МГУ, Москва;

<sup>2</sup>Географический факультет МГУ, Москва;

<sup>3</sup>ГАИШ МГУ, Москва

*Спутники-близнецы GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) работают на орбите уже 15 лет, выполняя мониторинг гравитационного поля Земли. В 2017 г. им на смену последует миссия GRACE Follow-On. Гравиметрические спутники предоставляют гидрологическую и геодинамическую информацию, позволяют отслеживать последствия изменений климата. Однако для использования данных GRACE необходима фильтрация шумов, для которой мы предлагаем использовать многоканальный сингулярный спектральный анализ (МССА). Этот метод мог бы служить базой для создания в России центра обработки данных второго уровня, необходимых во многих приложениях, в том числе для сопровождения задач высокоточной инерциальной навигации. В статье представлено сравнение результатов GRACE с наземными абсолютными измерениями. Обсуждается важность построения сетей гидрологического мониторинга для сопровождения наземных гравиметрических сетей.*

### Введение

В наших последних статьях [1, 2, 19] мы уже описывали миссию GRACE и ее результаты, полученные нами по территории России. Задавшись целью не повторяться, ниже мы кратко обсудим то, какие принципиально важные результаты могут быть получены с помощью таких миссий, как GRACE и идущей ей на смену GRACE Follow-On, сделаем небольшой обзор основных достижений GRACE, связанных с мониторингом вод суши и океана, исследованиями климата и др. Мы приведем некоторые иллюстрации, которые кажутся нам интересными, а также представим сравнение с данными наземной гравиметрии. Наша цель – призвать к созданию в России собственного центра обработки данных GRACE и внедрению метода МССА для фильтрации данных.

## Успехи миссии GRACE

Не вдаваясь в технические стороны работы миссии GRACE, широко описанные в литературе [3, 4, 20], напомним, что конечным продуктом (данными) GRACE второго уровня L2 являются ежемесячные значения коэффициентов Стокса разложения гравитационного поля Земли [6], на основе которых исследуется перераспределение масс как на суше (гидрология, гляциология), так и в океане. Данные за 2002 г., когда миссия GRACE была запущена и проходила калибровку, а также за некоторые месяцы 2016–2017 гг., когда из-за нехватки заряда батарей часть оборудования, при попадании спутников в тень Земли, приходится отключать, нельзя считать образцовыми. Однако данные с 2003 по 2016 г., когда спутники отлично работали, позволили научному сообществу выявить немало интересных геодинимических явлений и вполне четко очертить круг вопросов, которые способны решать космические миссии, подобные GRACE. В печати появились сотни статей, а в лабораториях и КБ усовершенствовали оборудование для следующей миссии GRACE Follow-On, запуск которой запланирован на осень 2017 г. ракетой Space X. Пятнадцать лет наблюдений позволили сформировать основной список наиболее востребованных прикладных направлений, использующих данные GRACE, среди которых одно из важнейших мест занимает гидрология. Каждый год результаты миссии GRACE и новые разработки представляют поочередно в Остине, Техас, и в Потсдаме, Германия, на собраниях рабочей группы “GRACE Science Team Meeting” (GSTM), все труды которой доступны on-line [5].

Результаты, базирующиеся на данных GRACE, можно подразделить на технические, служащие усовершенствованию оборудования и методов обработки, геофизические и геодинимические, позволяющие делать выводы об идущих на планете климатических изменениях и вносящие вклад в гидрологию, океанологию, сейсмологию, теорию фигуры Земли, а также на прикладные – используемые в работе гидрологических служб, для задач вооруженных сил и др. Для фильтрации данных GRACE, отягченных шумами в виде меридиональных полос (stripes), причина которых кроется в полярной орбите и резонансах, разрабатываются математические методы [10], применяющиеся также для решения обратных задач гравиметрии, для преобразований от глобального спектрального представления к локальному пространственному, для исключения утечки сигнала с территории континентов на прибрежные районы океана (метод масконов) и др.

В качестве примеров успешного применения данных GRACE можно привести работы Джона Вара (J. Wahr) [8], Эрика Айвинса (E.R. Ivins), Ричарда Пелтье (R. Peltier), Арчи Паулсона (A. Paulson) [9] по эффекту послеледникового поднятия GIA, Пера Кнудсена (Per Knudsen), Изабеллы Великоньи (I. Velicogna) по таянию ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды, Дона Чамбреса (Don Chambers) [21], Кристофера Печуча (C.G. Piecuch), Руи Потне (R.M. Ponte), Катерины Квин (Katherine J. Quinn) по перераспределению масс океана, Джона Кроули (John Crowley), Горана Павлика (G. Pavlic), Филиппа Фраппара (F. Frappart) [11], Феликса Ландерера (F. Landerer) [12], Йоргана Куше (Juergen Kusche) [13], Павла Дитмара по гидрологии рек и прогнозам наводнений, Цзинли Чена (J. Chen) [22], Иоланты Настулы (I. Nastula) и Ричарда Гросса (R. Gross) по влиянию на вращение Земли, Ричарда Рея (R.D. Ray) по океаническим приливам, Оливье де Вирона (O. de Viron), Валентина Михайлова, Си Кей Шама (C.K. Shum) [14] по мониторингу землетрясений, Джин Дике (J. Dickey), Сяопина Ву (Xiaoping Wu) [23], Минкана Чена (M. Cheng) по положению геоцентра, сжатию гравитационного поля Земли, глобальной геофизике. С большинством из перечисленных работ, так или иначе, можно познакомиться на сайте GSTM [5].

Помимо трех основных центров обработки данных GRACE, расположенных в Техасе (CSR), Калифорнии (JPL) в США и в Германии (GFZ), многие заинтересованные страны открыли у себя центры обработки данных. К примеру, в Шанхайском университете Tongji в КНР открыт центр обработки, предоставляющий одни из самых точных данных GRACE уровня L2. Французское космическое агентство CNES также создало центр обработки с интерактивным порталом "The GRACE plotter" (<http://www.thegraceplotter.com/>), разработанным и поддерживаемым Стефаном Бургунь (Stéphane Bourgogne) под руководством Жана Мишеля Лемуана (J.-M. Lemoine).

### Тренды в перераспределении масс по данным GRACE

Отдав должное заслугам зарубежных коллег, представим некоторые результаты, полученные нами на основе данных GRACE. С 2009 года [15, 16] для фильтрации данных GRACE мы применяем многоканальный сингулярный спектральный анализ (MCCA) в спектральной области к коэффициентам Стокса до 60 степени и порядка. Эта методика позволяет отфильтровать шумы и выделить компоненты разной периодичности в многомерных спутниковых данных. На рис. 1 показана первая главная компонента, отражающая тренд в перераспределении масс суши с 2003 по 2016 год. Величины переведены в эквивалентный уровень воды (плоский слой), среднее вычтено. Видно, как ледники Гренландии, Антарктиды, Аляски, Гималаев теряли массу за прошедшее десятилетие.

2003-2016

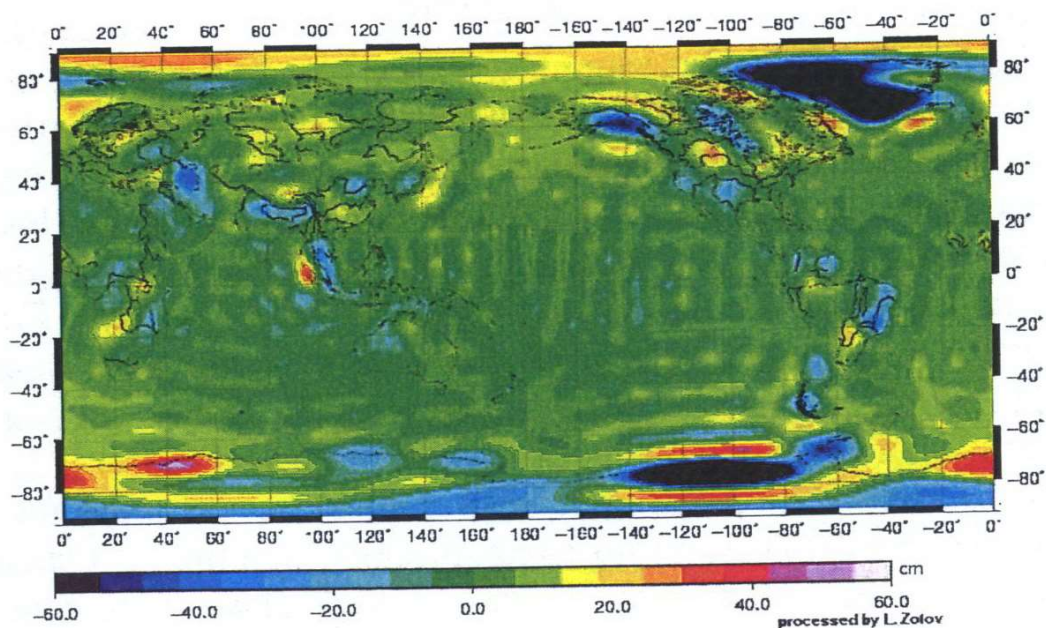


Рис. 1. Тренды в глобальном распределении масс суши с 2003 по 2016 г., полученные МССА-обработкой данных GRACE

На рис. 2 представлены такие же тренды, но уже по территории России и Евразии. Мы подробно писали о них в своих работах [1, 2]. Обратим внимание на положительные аномалии в бассейнах Оби и Енисея, как полагают, связанные с деградацией вечной мерзлоты [11], а также на отрицательную аномалию в регионе Каспийского моря, видимо, связанную с падением уровня Каспия [22]. На всех представленных картах тренды послеледникового поднятия GIA, особенно сильные в Скандинавии, Канаде, Западной Антарктиде, исключены по модели Паулсона [9].

2003-2016

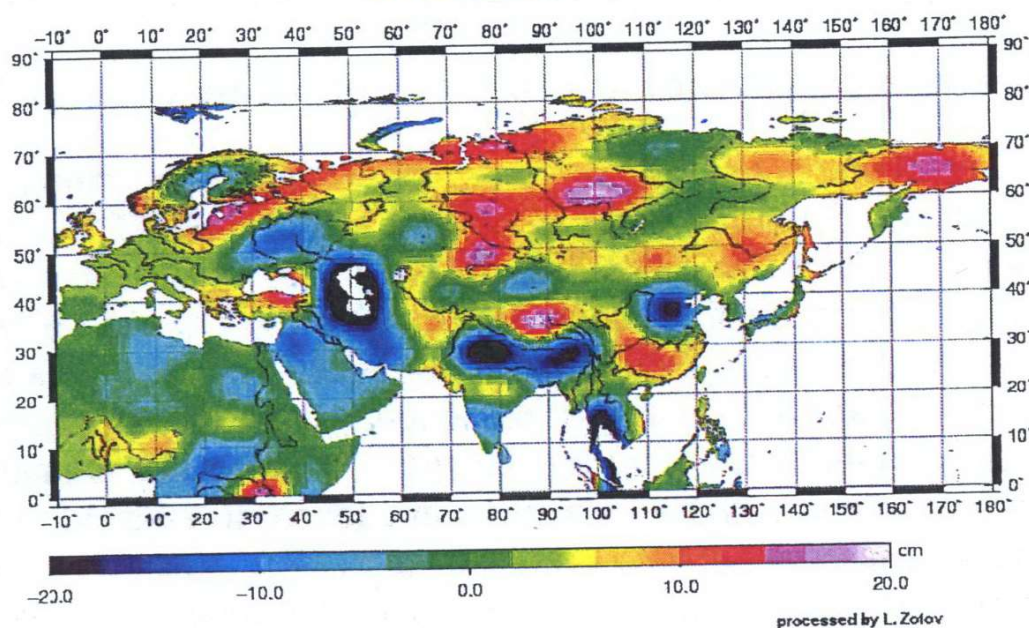


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для территории России и Евразии

На рис. 3 представлен первая главная компонента, полученная в работе [17] применением МССА к данным по массе океана с сайта GRACE Tellus, предварительно отфильтрованным по методике Дона Чамберса [21]. Сигнал над океаном существенно слабее гидрологического сигнала над сушей и требует особой методики выделения. На карте видно, что сток пресных вод с ледниковых щитов приводит к образованию отрицательных аномалий масс вокруг Гренландии и Антарктиды, что связано с перераспределениями солености и плотности. Данные GRACE являются единственным на сегодня способом непосредственного мониторинга глобальной массовой (нестерической) компоненты изменений уровня моря.

### PC 1 2003-2015

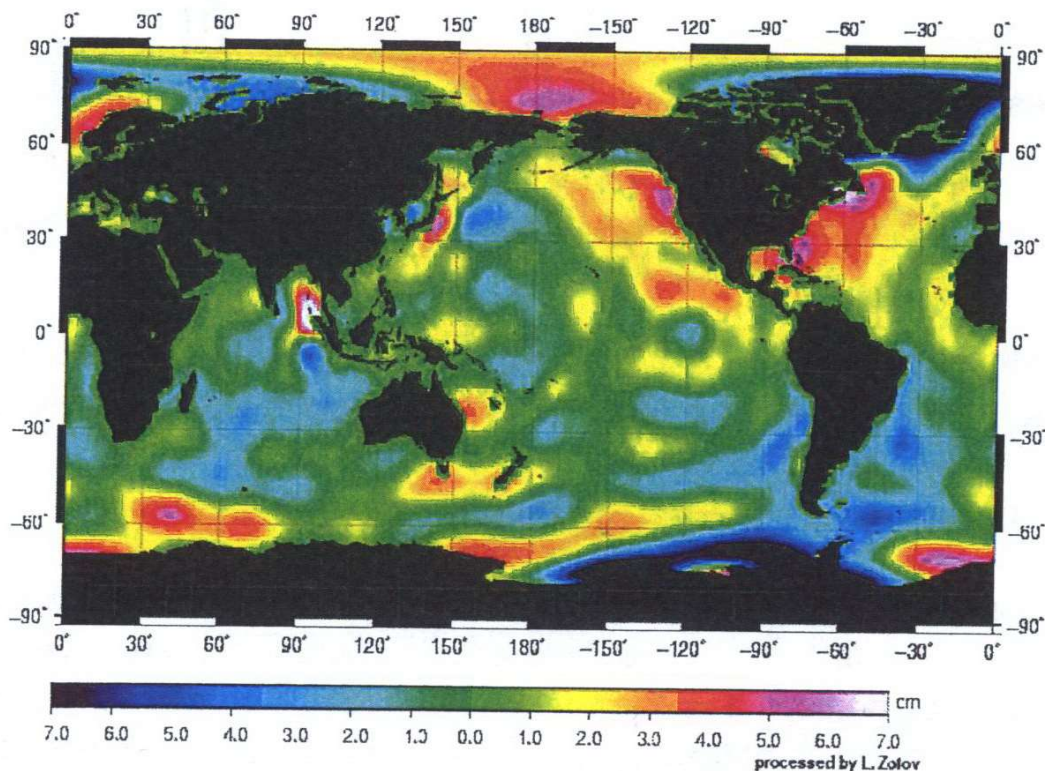


Рис. 3. Тренды в глобальном распределении масс океана с 2003 по 2015 г., полученные МССА-обработкой данных GRACE по придонному давлению [21]

На рис 4. представлены графики изменений коэффициента разложения гравитационного потенциала  $J_2$  ( $-C_{20}/\sqrt{5}$ ) с 1976 г. по данным лазерной локации спутников (ЛЛС) и с 2002 г. – по данным GRACE. Хотя спутники GRACE и не столь чувствительны к этой низшей гармонике гравитационного потенциала, отражающей полярное сжатие, данные GRACE используются для уточнения изменений этого важнейшего геофизического параметра, связанного также со скоростью вращения Земли. В работе [18] нами выполнено МССА-разложение коэффициента  $J_2$ , показавшее смену его долговременного тренда в 2005 г. от уменьшения к увеличению, что заметно также на рис. 4. Любопытно, что примерно в это время сменился тренд и в скорости вращения Земли, планета стала ускоряться.

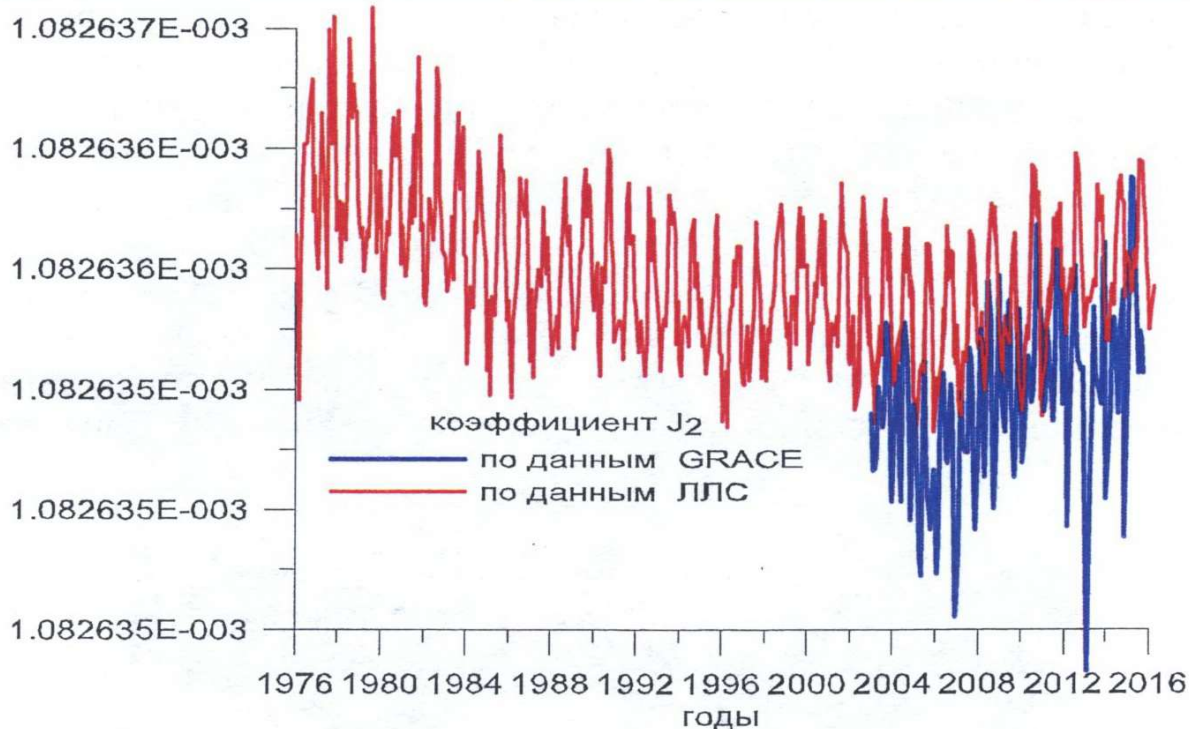


Рис. 4. Изменения коэффициента  $J_2$  разложения гравитационного поля Земли по данным ЛЛС (с 1976 г.) и GRACE

Коэффициенты Стокса  $C_{21}$  и  $S_{21}$ , влияющие на движение полюса, также представляют большой интерес [23], но здесь не представлены.

### Сравнение с данными абсолютной гравиметрии

Ниже мы представляем результаты сравнения данных GRACE с наземными наблюдениями, выполненными абсолютными гравиметрами ГАБЛ-М. На рис. 5 вверху представлены значения, полученные Виктором Юшкиным на измерительном пункте «Главный гравиметрический пункт СССР» в обсерватории ГАИШ на Красной Пресне. Точечные наблюдения на пункте отражают локальное распределение масс, в то время как ряд данных GRACE, выбранный нами в единственной точке на градусной сетке с координатами Москвы ( $37^\circ$  В.Д.,  $56^\circ$  С.Ш.), отражает распределение масс над большой территорией. Данные GRACE имеют пространственное разрешение около 300 км, и их сравнение с точечными наблюдениями не совсем корректно, тем не менее, совпадение оказалось на редкость хорошим. Взятые исходные данные GRACE центра JPL, их сглаживание выполнено взятием первых 10 главных компонент (ГК), полученных при МССА-обработке. Пунктиром показан ход послеледникового поднятия GIA [9].

На рис. 5 внизу представлены сравнения для полигонов вблизи газового месторождения недалеко от Уренгоя. Две кривые 9004 и 9006, хорошо совпадающие с данными GRACE, соответствуют гравиметрическим

наблюдениям в стороне от месторождения. Кривые 9002 и 908 отражают измерения, выполненные с гравиметром ГАБЛ-М в центре месторождения природного газа, из которого проводилась добыча, поэтому кривые уходят вниз. Можно заключить, что данные GRACE неплохо (в пределах нескольких микрогал) согласуются с наземными измерениями, если на последние не оказывают преимущественного влияния локальные процессы в точке наблюдений.

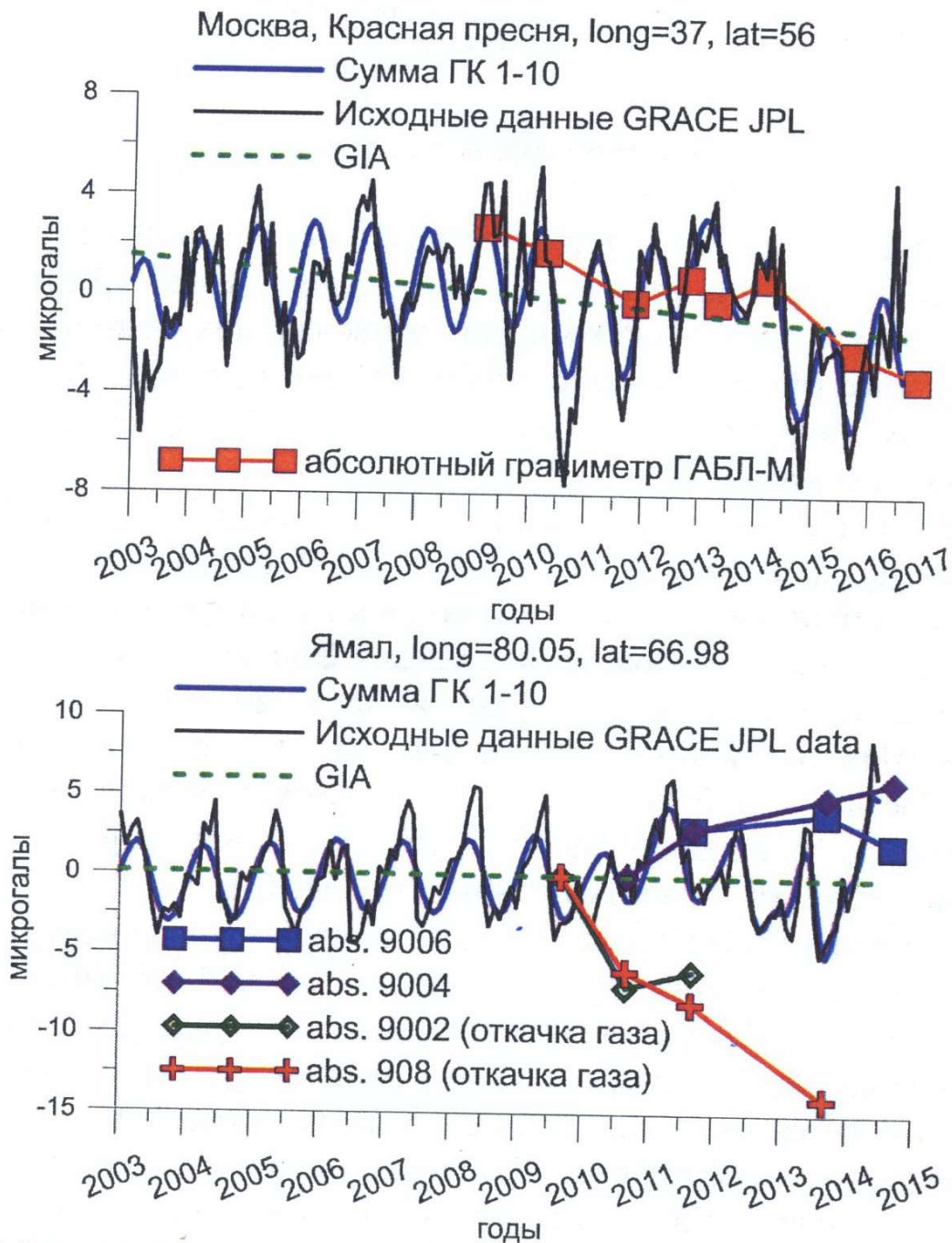


Рис. 5. Вверху: сравнение данных абсолютных гравиметрических измерений на Красной Преснее (квадраты, измерения В. Юшкина, ГАБЛ-М) с данными GRACE (исходные и сглаженные) для координат Москвы.

Внизу: Сравнение измерений на месторождении газа недалеко от Уренгоя с данными GRACE. Пунктиром показан ход послеледникового поднятия GIA [9]



Сравнения данных спутниковой и наземной гравиметрии, подобные представленным на рис. 5, проводят также в Канаде, США, Китае. Большой интерес представляют сравнения с долговременными рядами стационарных наземных наблюдений сверхпроводящими гравиметрами. Поскольку на показания абсолютных гравиметров существенно влияет влагозапас почв, крайне желательным видится сопровождение таких измерений гидрологической информацией, например, показаниями измерителей уровня воды на близлежащих водоемах.

### Заключение и дискуссия

Представленный в данной работе обзор достижений миссии GRACE, работающей на орбите уже 15 лет, показывает крайнюю полезность такого рода космических миссий, позволяющих не только отслеживать глобальные геодинамические процессы, но и проводить мониторинг региональных процессов, связанных с гидрологией рек, землетрясениями, изменениями климата и др.

Конечно, для проектирования и запуска таких миссий, как GRACE и планирующейся к запуску в 2017 г. GRACE FO, необходимо сотрудничество между странами и многолетняя работа по усовершенствованию аппаратуры и методов обработки данных. Однако во многих странах, даже не имеющих отношения к разработке и запуску, созданы центры обработки открытых данных GRACE. Было бы полезным создание такого центра в России, тем более что он не потребует большого количества рабочих мест, а в наших руках уже имеется некоторый опыт и такая уникальная методика обработки данных, как МССА.

Одним из наиболее успешных приложений оказалось использование данных GRACE для мониторинга гидрологической обстановки. Так, в США создан центр слежения за состоянием рек и влагозапасом, а также для своевременного предупреждения о наводнениях и засухах, работа которого опирается на данные GRACE. Следует отметить, что постоянно меняющаяся геодинамическая обстановка не позволит решать задачи инерциальной навигации на высоком (сантиметровом) уровне точности без постоянного мониторинга и прогнозирования распределения масс, что возможно только на основе непрерывных измерений как из космоса, посредством гравиметрических миссий, так и локальной сетью гравиметрических станций, сопровождаемых гидрологическими измерениями.

В свете очевидной научной пользы большие надежды возлагаются на успешный запуск и калибровку миссии GRACE FO, снабженной на два порядка более точной, чем микроволновая, лазерной системой измерения дальности «спутник – спутник». Такая точность потребует усовершенствования модели приливов, учета более тонких геофизических факторов и одновременно обеспечит продолжение исследований на новом высоком уровне в следующем десятилетии.

### Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00155 – анализ гидрологических данных) и гранта РФФИ (проект № 16-05-00753-а – анализ гравиметрической информации).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зотов Л., Фролова Н.Л., Телегина А.А. Гравитационные изменения в бассейнах крупных рек России // Альманах современной метрологии, 2015, № 3, с. 142–158.
2. Зотов Л., Фролова Н.Л., Шам С.К. Гравитационные аномалии в бассейне крупных рек России // Природа, 2016, № 5, с. 3–8.
3. Case K., Kruizinga G, Sien-Chong Wu. GRACE Level 1B Data Product User Handbook, 2004, [ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/Handbook\\_1B\\_v1.2.pdf](ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/Handbook_1B_v1.2.pdf).
4. Bettadpur S. Level-2 Gravity Field Product User Handbook, 2007, [ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/L2-UserHandbook\\_v2.3.pdf](ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/L2-UserHandbook_v2.3.pdf).
5. Past GRACE Science Team Meetings, <http://www2.csr.utexas.edu/grace/GSTM/past.html>.
6. Панелеев В.Л. Теория фигуры Земли / Курс лекций, 1990, <http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/lecture/tfe/index.html>.
7. Сагитов М.У. Лунная гравиметрия. – М.: Наука, 1979.
8. Wahr J., Molenaar M., and Bryan F. Time variability of the earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using grace // J. of Geophys. Res., 1998, 103 (B12), p. 30205–30229, doi:10.1029/98JB02844.
9. Paulson A., Zhong S., and Wahr J. Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data // Geophys. J. Int., 2007, 171, 497.
10. Klees R., Revtova E.A., Gunter B.C., Ditmar P., Oudman E., Winsemius H.C., Savenije H.H.G. The design of an optimal filter for monthly GRACE gravity models // Geophys. J. Int., 2008; 175 (2), 417-432, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03922.x.

11. Frappart, F., Papa F., Guntner A., Ramillien G., Prigent C., Rossow W., Bonnet M. Interannual variations of the terrestrial water storage in the Lower Ob' Basin from a multisatellite approach // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2010, 14, 2443–2453.
12. Landerer F., Dickey J., Zlotnicki V. Terrestrial water budget of the Eurasian pan-Arctic from GRACE satellite measurements during 2003–2009 // *J. of Geophys. Res.: Atmospheres*, 2010, 115 (D23), D 23115, doi:10.1029/2010JD014584.
13. 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, 83, p. 903–913.
14. Wang, L., Shum C.K. and Jekeli C. Gravitational gradient changes following the 2004 December 26 Sumatra–Andaman Earthquake inferred from GRACE // *Geophys. J. Int.*, 2012, 191, 1109–1118, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05674.x.
15. Zotov L., Shum C.K. Singular spectrum analysis of GRACE observations // *AIP Proceedings of the 9th Gamow summer school, Odessa, 2009.*
16. Zotov L. Application of Multichannel singular spectrum analysis to geophysical fields and astronomical images // *Advances in Astronomy and Space Physics*, 2012, 2, p. 82–84.
17. Зотов Л., Власова В. Изменения придонного давления по данным спутников GRACE / Сборник публикаций конференции «Комплексные исследования морей России», КИМР, Севастополь, 2016, с. 275–280.
18. Зотов Л., Балакирева Е. Исследования вариаций коэффициента гравитационного поля J2 методом ССА / Материалы 4-й Тектонофизической конференции, ИФЗ РАН, Москва, 2017, с. 495–501.
19. Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Зотов Л.В. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги // *Водные ресурсы*, 2017, т. 44, № 3, с. 1–13.
20. Яшкин С.Н. Спутниковая градиентометрия и системы «спутник – спутник». – М. МИИГАиК, 2009.
21. Chambers D.P. and Bonin J.A. Evaluation of Release 05 time-variable gravity coefficients over the ocean // *Ocean Science*, 2012, 8, 859–868.
22. Chen J.L., Wilson C.R., Tapley B.D., Save H., Cretaux J.-F. Long-Term and Seasonal Caspian Sea Level Change From Satellite Gravity and Altimeter Measurements // *J. Geophys. Res.*, 2017, 122, doi: 10.1002/2016JB013595.
23. Wu X., Heflin M.B., Ivins E.R., and Fukumori I. Seasonal and inter-annual global surface mass variations from multisatellite geodetic data // *J. Geophys. Res.*, 2006, 111, B09401, doi:10.1029/2005JB004100.