Зотов Л.В.[1,2], Фролова Н.Л.[3], Юшкин В.Д.[1]
[1]ГАИШ МГУ (wolftempus@gmail.com), [2]МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва,
[3]Географический ф-т МГУ

ИЗМЕНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В БАССЕЙНЕ ВОЛГИ ПО ДАННЫМ GRACE/GRACE-FO И ВЛИЯНИЕ НА ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ

Аннотация: Спутники GRACE (2002-2017) и GRACE-FO (с 2018) предоставляют данные о его ежемесячных изменениях гравитационного поля Земли. Мы применяем многоканальный сингулярный спектральный анализ (МССА) для фильтрации данных по гравитационному полю JPL Level 2 релиз 6.3 и накладываем маски бассейнов рек из гидрологической базы STN-30p. Это позволяет получить главные компоненты изменений масс для бассейнов рек России. На их основе получены изменения масс в Чебоксарах и в среднем по бассейну Волги. Выявлено, что весна 2026 г. оказалась экстремальной по массонакоплению за время работы GRACE-FO. Из-за этого тренд уменьшения эквивалентного уровня воды (ЭУВ) в бассейне Волги составлявший -0,26 см/год по данным GRACE сменился на возрастающий 0,24 см/год по данным GRACE-FO.

Вращение Земли неравномерно и зависит как от моментов внешних сил, так и от перемещений масс в оболочках планеты и деформации её фигуры. Тензор инерции Земли жестко связан с ее гравитационным полем. Приведена методика вычислений влияния изменений масс на компоненты тензора инерции Земли и через них – на длительность суток LOD и координаты полюса.

Ключевые слова: спутниковая гравиметрия, GRACE, LOD, движение полюса, гидрология.

Zotov L.V.[1,2], Frolova N.L.[3], Yushkin V.D.[1]
[1]SAI MSU (wolftempus@gmail.com), [2]HSE University, Moscow,
[3]Faculty of Geography, MSU

CHANGES OF THE GRAVITY FIELD IN VOLGA BASIN FROM GRACE/GRACE-FO AND INFLUENCE ON THE EARTH ROTATION

Abstract:. The GRACE (2002-2017) and GRACE-FO (since 2018) satellites provide data on its monthly changes of the gravity field of the Earth. We use multichannel singular spectral analysis (MSSA) to filter JPL Level 2 release 6.3 data on gravity field and apply river basins masks from Simulated Topological Network (STN-30p) database. That allows to obtain principal components of mass changes for the Russian river basins. Using them we obtained the mass changes in Cheboksary and in average over Volga basin. Spring 2026 found to be extremal in terms of mass storage over GRACE-FO time span. The negative trend of equivalent water height (EWH) for the Volga basin of -0.26 cm/year from GRACE has changed to the positive of 0.24 cm/year from GRACE-FO.

Earth rotation is variable and depends on the moments of external forces, on the mass transfer in the planetary layers, and changes of the figure of the Earth. Earth's tensor of inertia is tight to its gravity field. We present the methodology of calculation of mass changes input into the Earth's tensor of inertia components, and, through them, on the length of day LOD and coordinates of the pole.

Keywords: satellite gravimetry, GRACE, LOD, polar motion, hydrology**.**

Введение

Спутники GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), запущенные с космодрома Плесецк 17.03.2002, окончили работу в октябре 2017 г. Миссия GRACE Follow-on (GRACE-FO или GFO) была запущена им на смену в мае 2018 г. В результате работы обоих миссий имеются ежемесячные разложения гравитационного поля Земли в виде файлов Уровня 2 (L2), предоставляемыми центрами обработки CSR, JPL, GFZ и др. Эти данные содержат коэффициенты Стокса до степени и порядка 96. Вычитая среднее поле, их преобразуют в ежемесячные карты, выраженные в эквивалентном уровне воды (ЭУВ) – толщине плоского слоя с плотностью воды, соответствующего аномалии гравитационного поля. Представленные так аномалии масс отражают гидрологическую обстановку, динамку вод в океане, таяние ледников, деформации в литосфере, приток вещества в мантии и др. [1-2] Многие из этих процессов идут на поверхности и связаны с климатическими изменениями. Интересны как региональные так и глобальные перераспределения масс, которые через тензор инерции, передаются вращению Земли по закону сохранения момента импульса. В данной работе, представив региональные изменения в бассейне Волги, мы даём методику их пересчета в эффекты во вращении Земли.

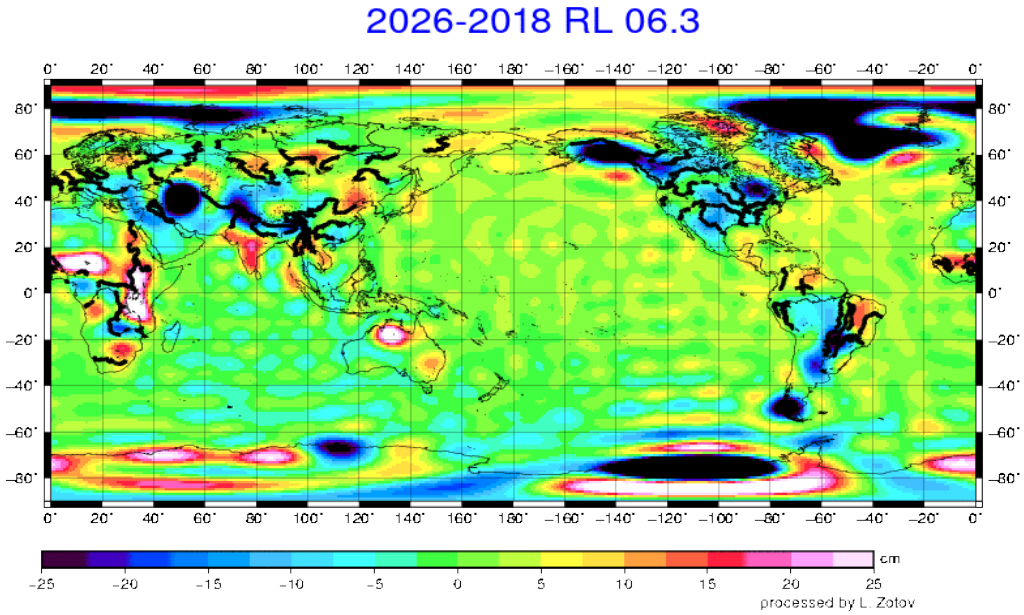

Рис. 1. Карта изменений масс в см ЭУВ по данным GRACE-FO с 2018 по 2026 г. (вычислена как разность МССА-тренда в эти годы).

Аномалии масс в бассейне Волги

Мы использовали данные JPL Level-2 RL06.3 со спутников GRACE и GFO, доступные на сайте PO.DAAC. Для GRACE мы использовали коэффициенты сферических гармоник с 04.2002 по 06.2017 до 60 степени и порядка. 21 отсутствовавших файла были кубически проинтерполированы (всего получено N=183 файла). Для GFO использованы файлы с 06.2018 по 06.2026 с двумя проинтерполированными месяцами 08.2018 и 09.2018, всего 98 файлов. Коэффициенты C_{20} были заменены на основе данных лазерной локации SLR. Эффект послеледникового поднятия (GIA) вычитался на основе модели Peltier ICE-6G. Мы применяли многоканальный сингулярный спектральный анализ (МССА, или расширенный EOF) [4, 5] для фильтрации данных GRACE и GFO уровня L2. Параметр лага в МССА выбран $L=48$ (4 года). На рис. 1 представлены изменения масс по всему миру за эпоху GFO, полученные как разность карт за 2026 и среднего за 2018 гг. для компоненты МССА-тренда (сингулярные числа 1+4). Они представлены в величинах ЭУВ (см), полученных по формуле

$$\Delta h(\varphi,\lambda,t)=\frac{2\pi a\,\bar{\rho}_e}{3\rho_w}\sum_{n=2}^{60}\sum_{m=0}^{n}\frac{2n+1}{1+k_n}W_n\left[\Delta\bar{C}_{nm}(t)\cos(m\lambda)+\Delta\bar{S}_{nm}(t)\sin(m\lambda)\right]P_n^m(\sin\varphi),$$

где $\Delta\bar{C}_{nm}(t),\Delta\bar{S}_{nm}(t)$ – изменения нормированных коэффициентов Стокса относительно среднего поля (взятого по эпохе GRACE), ρ_{ave} , ρ_w – средние плотности Земли и воды, k_n - нагрузочный коэффициент Лява для степени *n*, W_n – коэффициент спектрального фильтра (нами принят равным единице).

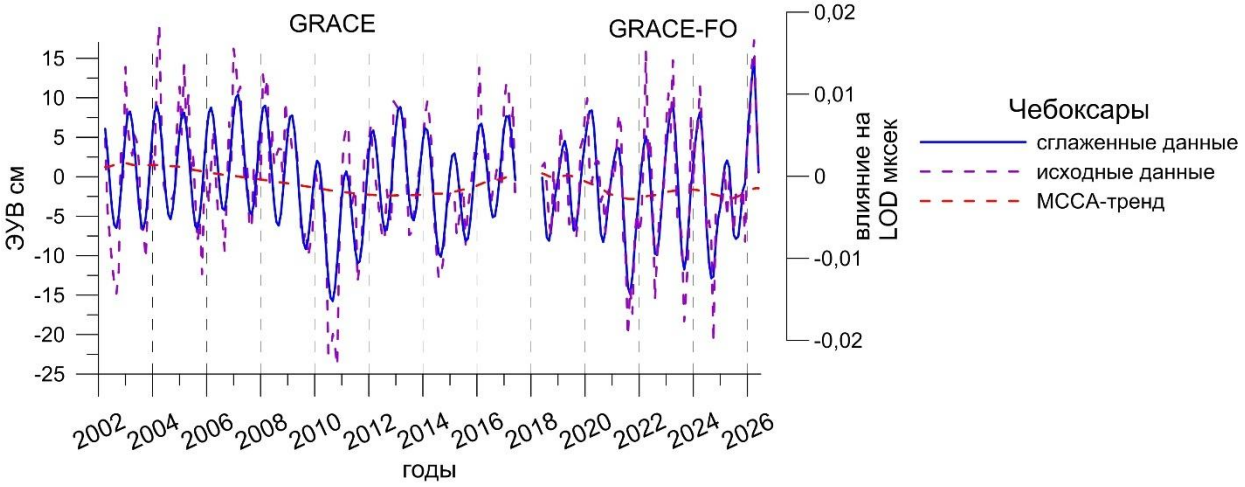

Рис. 2. Изменения масс в географическом пункте 56º СШ, 47º ВД, Чебоксары, по данным GRACE и GRACE-FO и шкала их влияния на LOD.

На рис. 2 представлены данные на площадке в 1 кв. градус с координатами г. Чебоксары. Заметен высокий максимум весны (апреля) 2026 г., связанный с большой аккумуляцией снега за зиму 2025-2026 гг. На глобальные данные были наложены маски бассейнов рек согласно базе данных Simulated Topological Networks (STN 30-p). Усредненные по бассейну Волги ЭУВ представлены на рис. 3. На их основе по интервалам работы GRACE (4.2002-6.2017) и GFO (6.2018-6.2020) были вычислены линейные тренды. Они составили -0,26 см/год по данным GRACE и 0,24 см/год по данным GFO. Умножая на площадь бассейна Волги 1476411 км^2, получаем, что 0,25 см ЭУВ эквивалентны 3,7 км^3 (гигатоннам) воды (для сравнения – Чеброксарское водохранилище имеет объем 4,6 км^3).

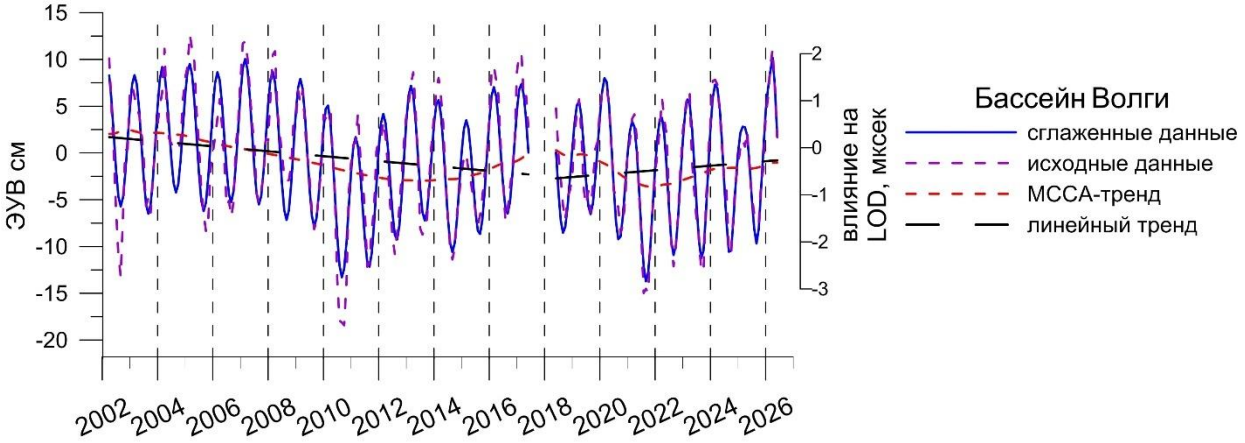

Рис. 3. Усредненные по бассейну Волги изменения ЭУВ по данным GRACE и GRACE-FO, их тренды и шкала влияния на LOD.

Методика вычислений эффектов во вращении Земли

Для вычисления вклада аномалий масс в компоненты вращения Земли – продолжительность суток LOD и координаты полюса x (по Гринвичу) и y (90° к востоку) необходимо:

а) Для каждого квадратного градуса бассейна вычислить аномальную массу Δm. Для этого плотность воды 1000 кг/м^3 умножить на величину аномалии ЭУВ в этой точке, переведенную в метры, а также на площадь квадрата сетки, ограниченного широтами φ_1, φ_2 и долготами λ_1,λ_2, определяемую по приближенной (без учета сжатия) формуле $S = \pi/180(\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1)(\lambda_2 - \lambda_1)a_e$, где a_e – экваториальный радиус Земли. К примеру, для градусной ячейки Чебоксар сглаженные данные (сумма с 1 по 10 сингулярных чисел МССА) в апреле 2026 г показали экстремальное значение 15,1 см ЭУВ. При умножении на площадь градуса на данной широте 7*10^9 м^2 (7 тыс км^2) была получена аномальная масса 1,1*10^{12} кг (1.1 Гт).

б) Вычислить вклад аномальной массы, сосредоточенной в ячейке с геоцентрическими координатами X, Y, Z (в простом сферическом приближении определявшимся по φ, λ, a_e) в компоненты симметричного тензора инерции по формулам

$$\Delta I = \begin{bmatrix} \Delta I_{11} = \Delta m(X^2 + Z^2) & \Delta I_{12} = -\Delta mXY & \Delta I_{13} = -\Delta mXZ \\ \Delta I_{21} = \Delta I_{12} & \Delta I_{22} = \Delta m(Y^2 + Z^2) & \Delta I_{23} = -\Delta mYZ \\ \Delta I_{31} = \Delta I_{13} & \Delta I_{32} = \Delta I_{23} & \Delta I_{33} = \Delta m(X^2 + Y^2) \end{bmatrix};$$

так, для упомянутой выше аномальной массы IV.2026 в одноградусной ячейке Чебоксар, приближенные декартовы координаты которой (2,43 2,61 5,28) тыс км получены ΔI_{33} = 1,34*10^{25}кг*м^2 и примерно такие же величины (но отрицательные) ΔI_{13}, ΔI_{23}. Значения ΔI_{11}, ΔI_{22} оказались в два с половиной раза больше.

в) Элементы, вычисленные в пункте б) просуммировать по всему бассейну реки и перевести в коэффициенты гравитационного потенциала по формулам [3]

$$\Delta C_{21} = -\frac{\Delta I_{13}}{a_e^2 M_e},\ \ \Delta S_{21} = -\frac{\Delta I_{23}}{a_e^2 M_e},\ \ \Delta C_{20} = -\frac{\Delta I_{33} - \frac{\Delta I_{11} + \Delta I_{22}}{2}}{a_e^2 M_e},$$

здесь M_e=5,972 *10^{14} кг– масса Земли.

г) Вычислить изменения длительности суток в секундах

$$\Delta LOD = 2\pi k \frac{\Delta I_{33}}{I_{33}\Omega},$$

где Ω = 7,2921150 × 10^{-5} рад/с – угловая скорость вращения Земли, I_{33}= 8,0349×10^{37} кг·м^2 – её полный осевой момент инерции, k=1,002737909350795 – коэффициент преобразования средних звездных суток к средним солнечным. Для упомянутого выше апреля 2026 для Чебоксар влияние составило 1,44*10^{-8} сек.

д) Вычислить компоненты возбуждающих функций для движений полюса как

$$[\chi_1, \chi_2] = -\frac{1.098\sqrt{5}\, a_e^2 M_e}{\sqrt{3}(1+k_2')(I_{33} - \frac{I_{11}+I_{22}}{2})}[\Delta C_{21}, \Delta S_{21}],$$

где $I_{11} \approx I_{22}$=8,01×10^{37} кг ·м^2 - экваториальные моменты инерции, $k_2' = -0{,}3081$ – число Лява для коэффициентов второго порядка. Далее если воздействие на полюс Земли этих возбуждений импульсно, амплитуды смещений полюса (в радианах) приравнять $[x, y] = \sigma_c[\chi_2, \chi_1]$, где $\sigma_c = 2\pi f_c$ – циклическая Чандлерова частота, $f_c = 0.843$ цикла в год. Если же воздействие ступенчато (переходная функция), амплитуду считать равной $[x, y] = [\chi_1, -\chi_2]$. Перевод радиан в сантиметры (без учета

эллиптичности) делается на основе того, что в одном радиане на поверхности Земли укладывается один её радиус a_e.

Так, для Чебоксар 4/2026 получены $[\chi_1, \chi_2] = [1{,}05 \quad 1{,}13] * 10^{-10}$ радиан, что дает для смещения полюса на [x,y]=[3,8 3,6] мм в импульсном режиме, либо [0,7 0,7] мм в ступенчатом. Для всего бассейна Волги получены $[\chi_1, \chi_2] = [1{,}42\ 1{,}63] * 10^{-8}$ рад, что может сместить полюс на [x,y]= [38, 36] см в импульсном режиме или на [9 10] см в ступенчатом. Можно также проинтегрировать вычисленные по бассейну Волги возбуждающие функции $[\chi_1, \chi_2]$ на всем интервале работы GFO посредством системы уравнений Эйлера-Лиувилля для движений полюса и получить графики координат полюса, представленные на рис. 4. Начальные условия положены нами нулевыми.

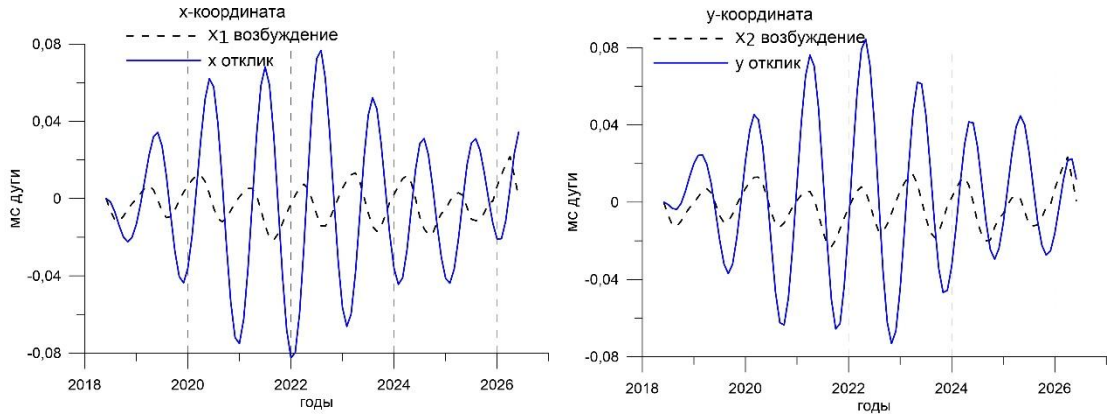

Рис. 4. Вычисленные по бассейну Волги возбуждающие функции $[\chi_1, \chi_2]$ (пунктиром) и отклики - координаты полюса (сплошным).

Заключение

На основе данных GRACE и GRACE-FO удается изучать перераспределение масс в бассейнах рек, в том числе детектировать суммарную аномалию осадков, снегонакопления и влагозапаса почвы. Данные имеют пространственное разрешение около 100 км, покрывают труднодоступные обширные территории и аккумулируют в себе все факторы, влияющие на гравитационное поле, в том числе гидрологические. В работе показаны величины ЭУВ для Чебоксар и в среднем по бассейну Волги, а также представлена методика вычисления оценок влияния региональных аномалий масс на вращение Земли. Полученные величины изменений LOD на микросекунды пока еще невозможно наблюдать. Сантиметровые точности определения положения полюса достижимы, но вычленить эффект Волги затруднительно, поскольку все регионы и оболочки Земли плавно влияют на положение полюса, а годовой ход имеет амплитуду в несколько метров. Рост масс в бассейне Волги имеет вектор воздействия на координаты полюса с примерно равными компонентами в положительном направлении по x и y, вычисленные в работе величины точны до порядка.

Список литературы

1. Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Шам С.К., Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России, Природа РАН, N 5, стр. 3-8, 2016
2. Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Орехова А.А., Юшкин В.Д., Особенности изменений гравитационного поля в бассейнах рек. впадающих в Каспийское море, в сборнике Арчиковские чтения-2025, стр. 66-70, ЧГУ, Чебоксары 2025.
3. Zotov L., C. Bizouard, Regional atmospheric influence on the Chandler wobble, Advances in Space Research, Vol. 55, Iss. 5, pp. 1300-1306, 2015, doi:10.1016/j.asr.2014.12.013