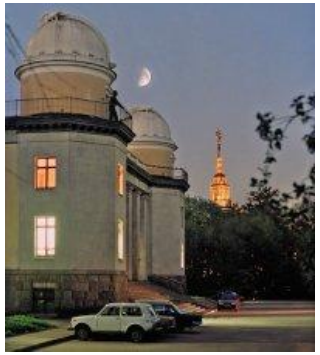


ИЗМЕНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПО ДАННЫМ GRACE И GRACE-FO В БАССЕЙНАХ РЕК И ВЛИЯНИЕ НА ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ

Зотов Л.В.[1,2], Фролова Н.Л.[3], Юшкин В.Д.[1]

[1]ГАИШ МГУ, [2]МИЭМ НИУ ВШЭ

[3]Географический ф-т МГУ



Москва
11 ноября 2026 г

International Centre for Global Earth Models (ICGEM)

News



Poster presentation at GGHS2026

The recent developments in SAMDAT project and its contribution to geodesy.

SAMDAT

The SAMDAT project funded by the DFG (German Research Foundation) aims to increase the performance of the ICGEM service and to meet the growing needs of the users.

Presentation from IAG Rimini 2025

ICGEM@IAG Rimini 2025
1.4 MiB

Recent activities and its contribution to the gravity field related products.

We redesigned the website

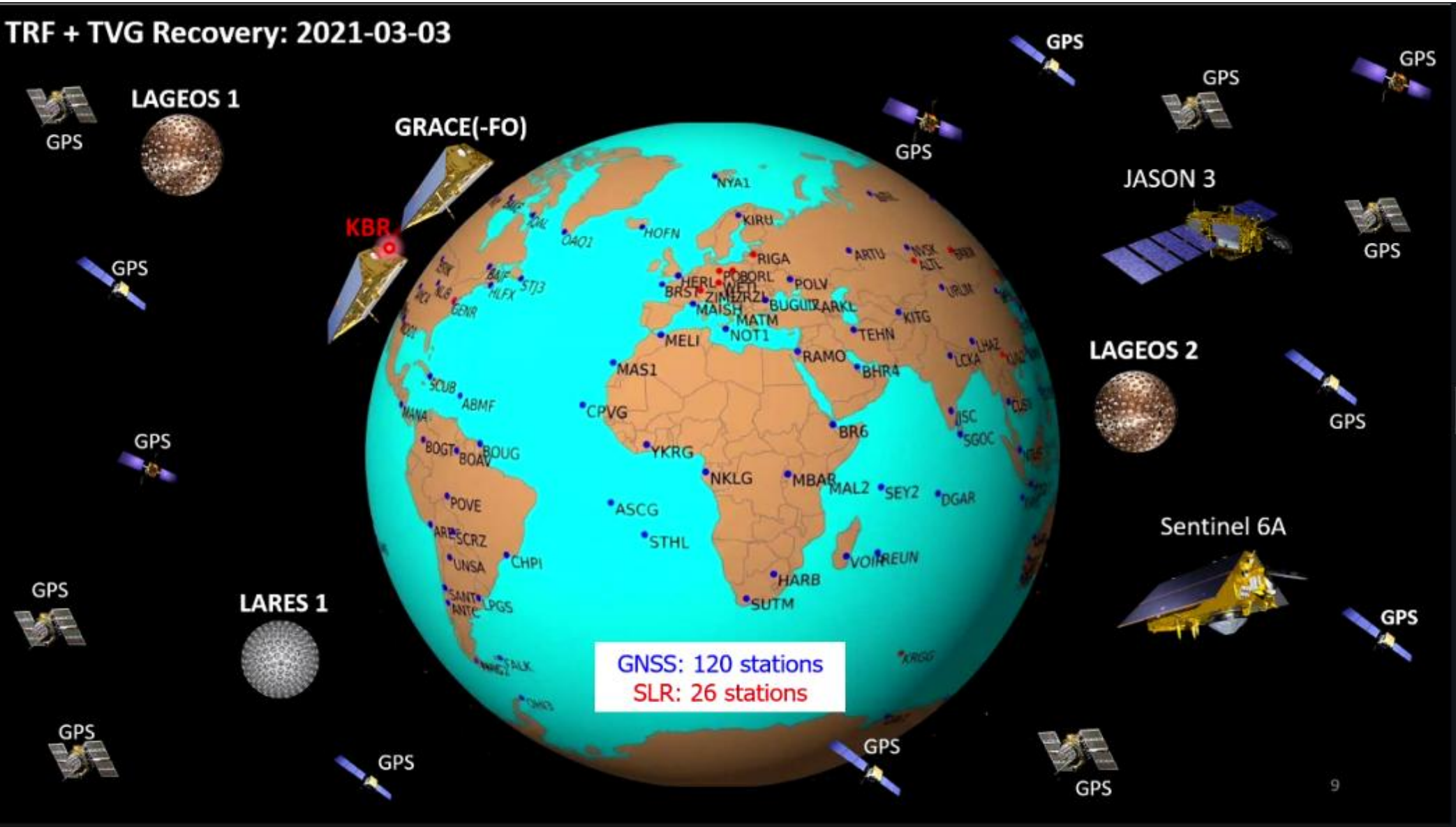
ICGEM keeps advancing: our website is now powered by the Bootstrap framework. Stay tuned for updates and a responsive design. We welcome your feedback!

User Survey results

The Results of the ICGEM User Survey are now available. Thank you to everyone who participated and shared their valuable insights.

Services coordinated by IGFS (International Gravity Field Service) of the IAG (International Association of Geodesy)

Bureau Gravimétrique International
International Gravimetric Bureau



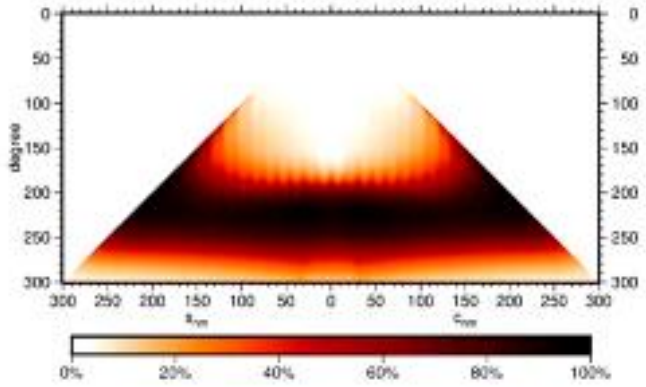
Удалить закрепление



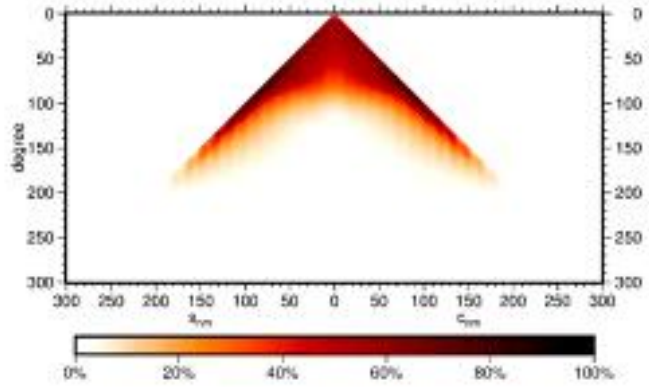
Claudio Abbondanza

GOCO2025s: Contribution of individual components

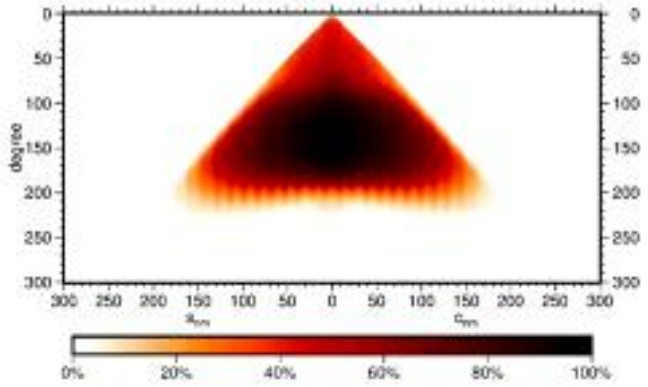
Спутниковая модель гравитационного поля



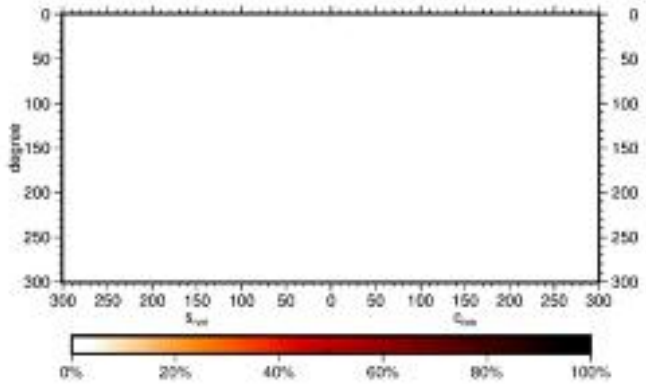
GOCE



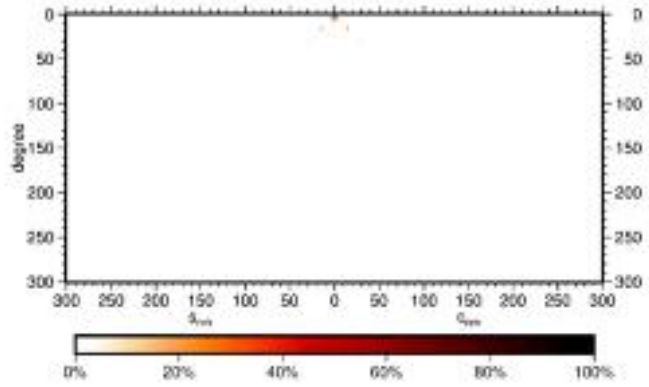
GRACE



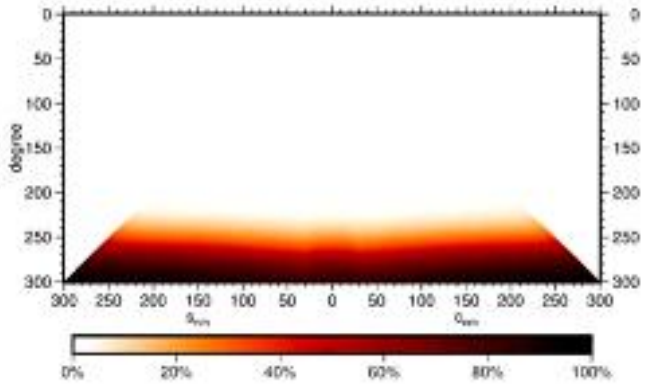
GRACE-FO



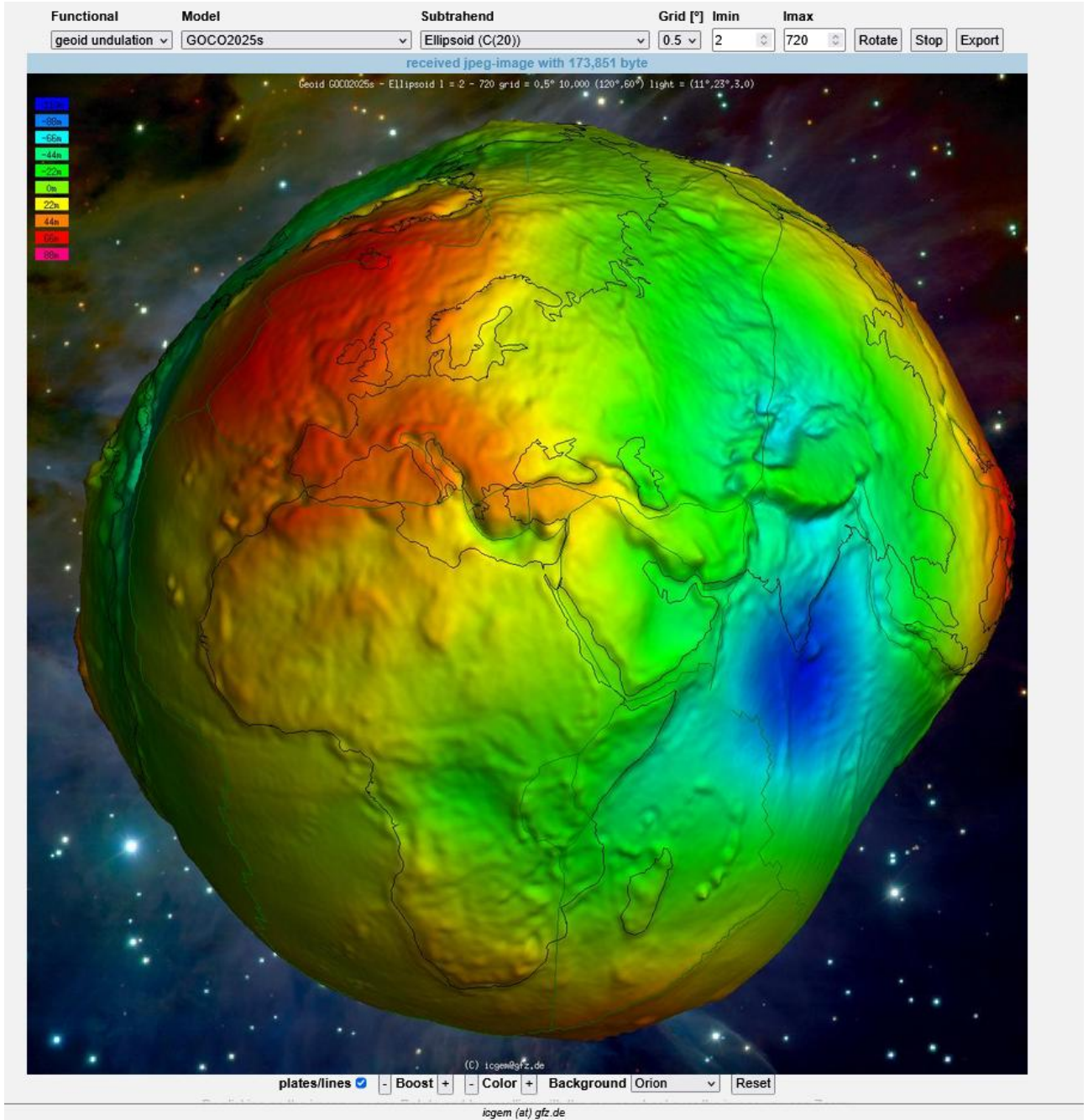
Kinematic orbits



SLR



Regularization



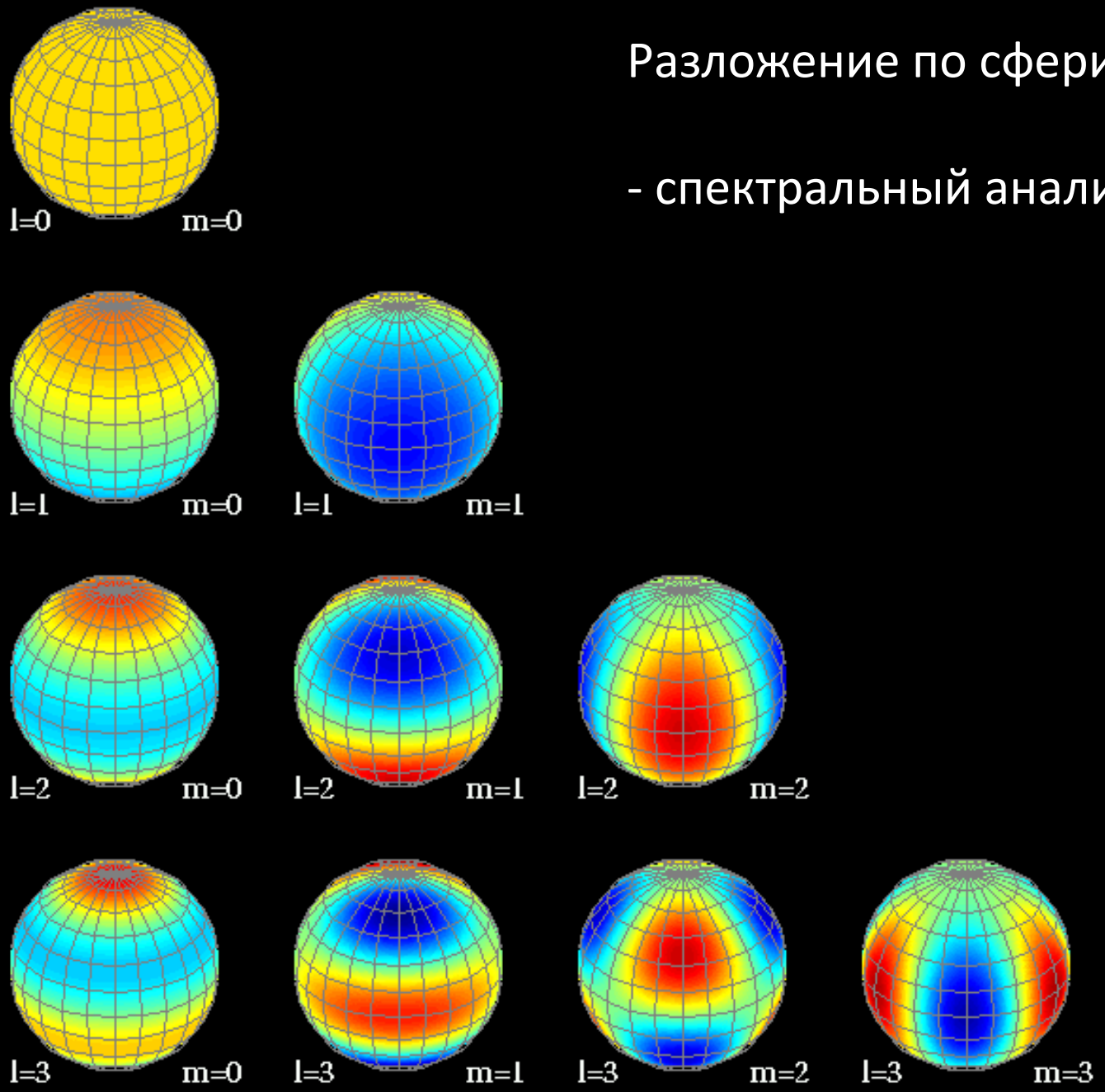
Основанная на сводных спутниковых данных модель геоида (GOCO2025s)

Геоид – согласно определению, введенному в 1873 г Листингом, - замкнутая поверхность равного потенциала тяжести (суммы притяжения и центробежного потенциала), примерно соответствующая уровню моря и продолженная под материками.

- Основной предмет теории фигуры Земли или физической геодезии

Gravity Observation Combination (GOCO)

GOCO

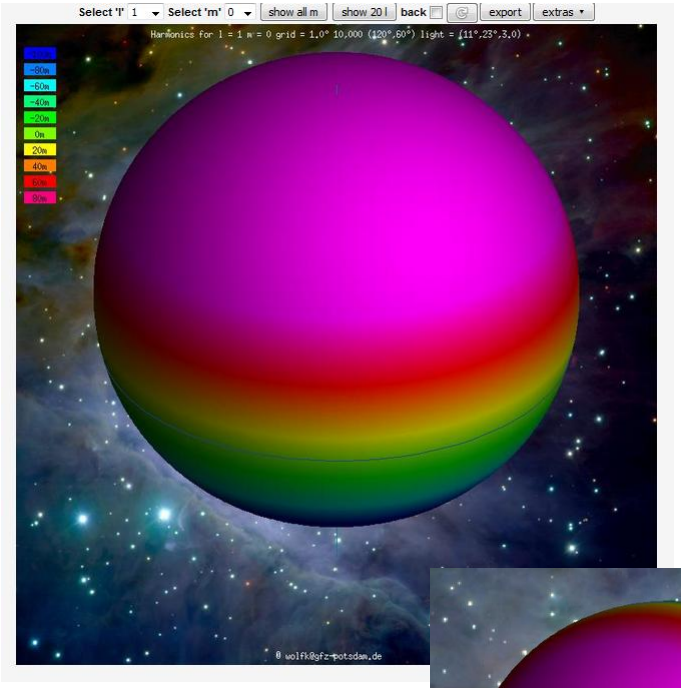


Разложение по сферическим гармоникам

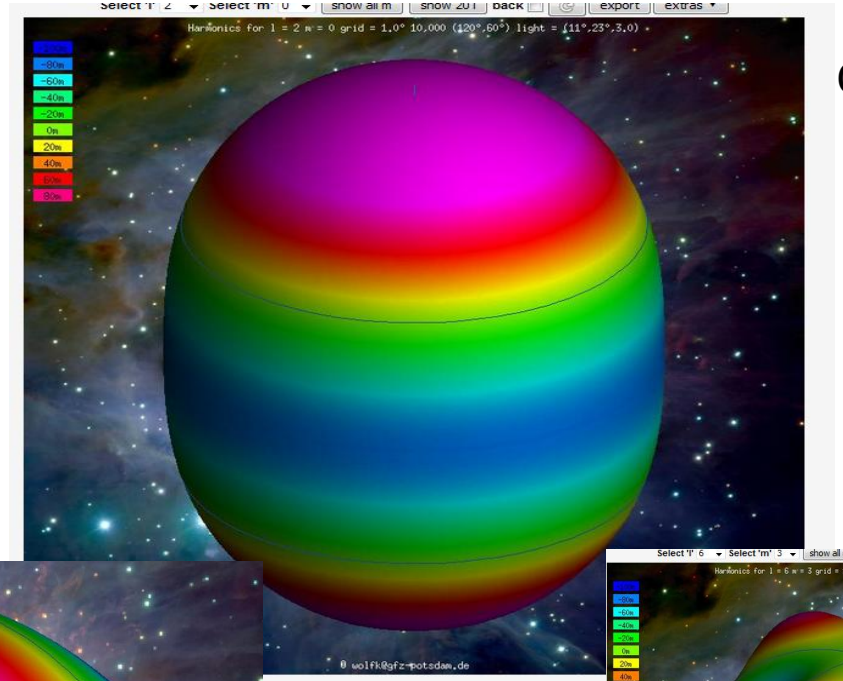
- спектральный анализ на сфере

Представление грав. поля в виде сферического разложения

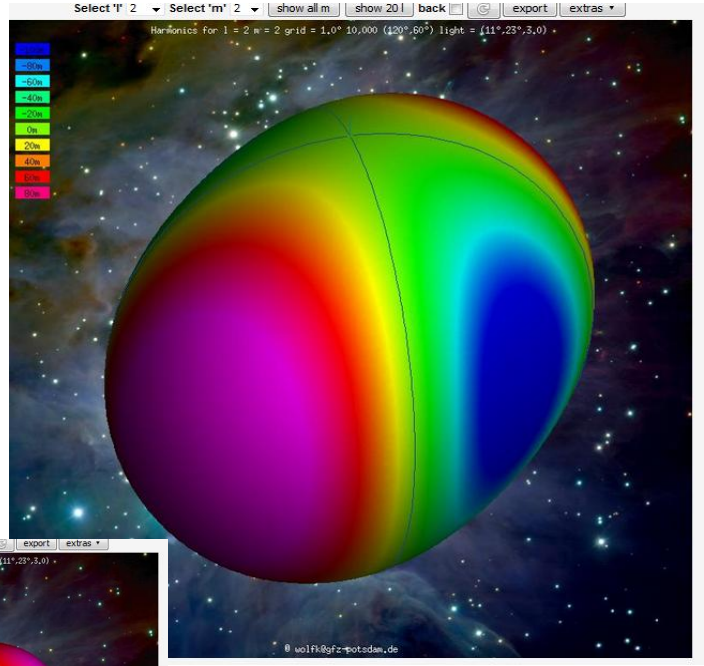
$$V(\varphi,\lambda,r)=\frac{GM}{r}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{a}{r}\right)^{n}\left(C_{nm}\cos m\lambda+S_{nm}\sin m\lambda\right)P_{n}^{m}(\sin\varphi)$$



C_{10}



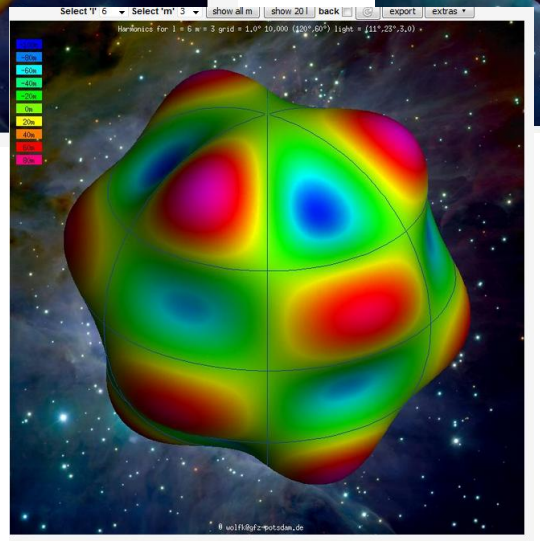
C_{20}



C_{22}



C_{21}



C_{63}

Изменения форм-фактора J_2 (сжатия геоида) по спутниковым данным

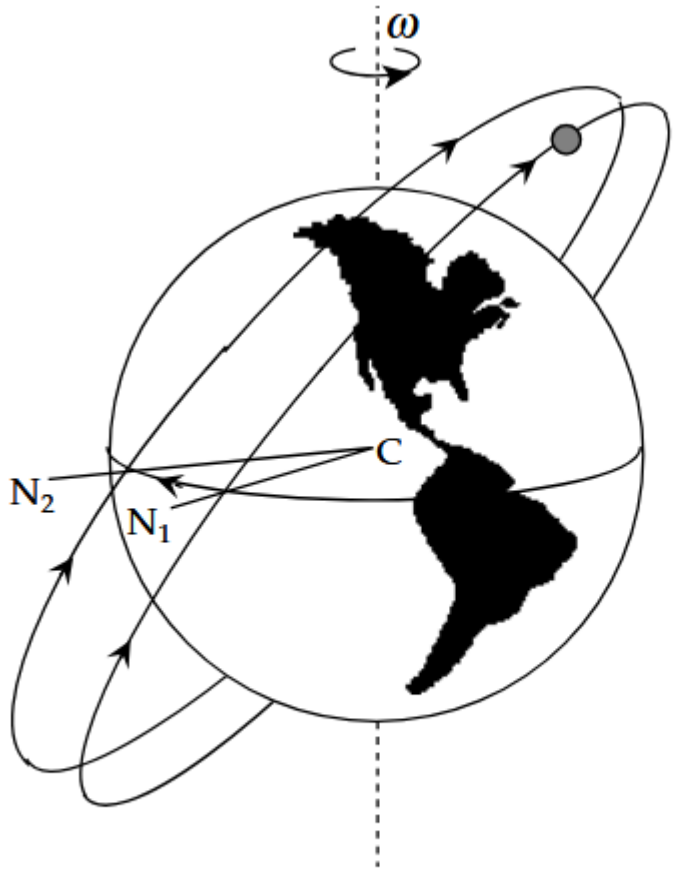
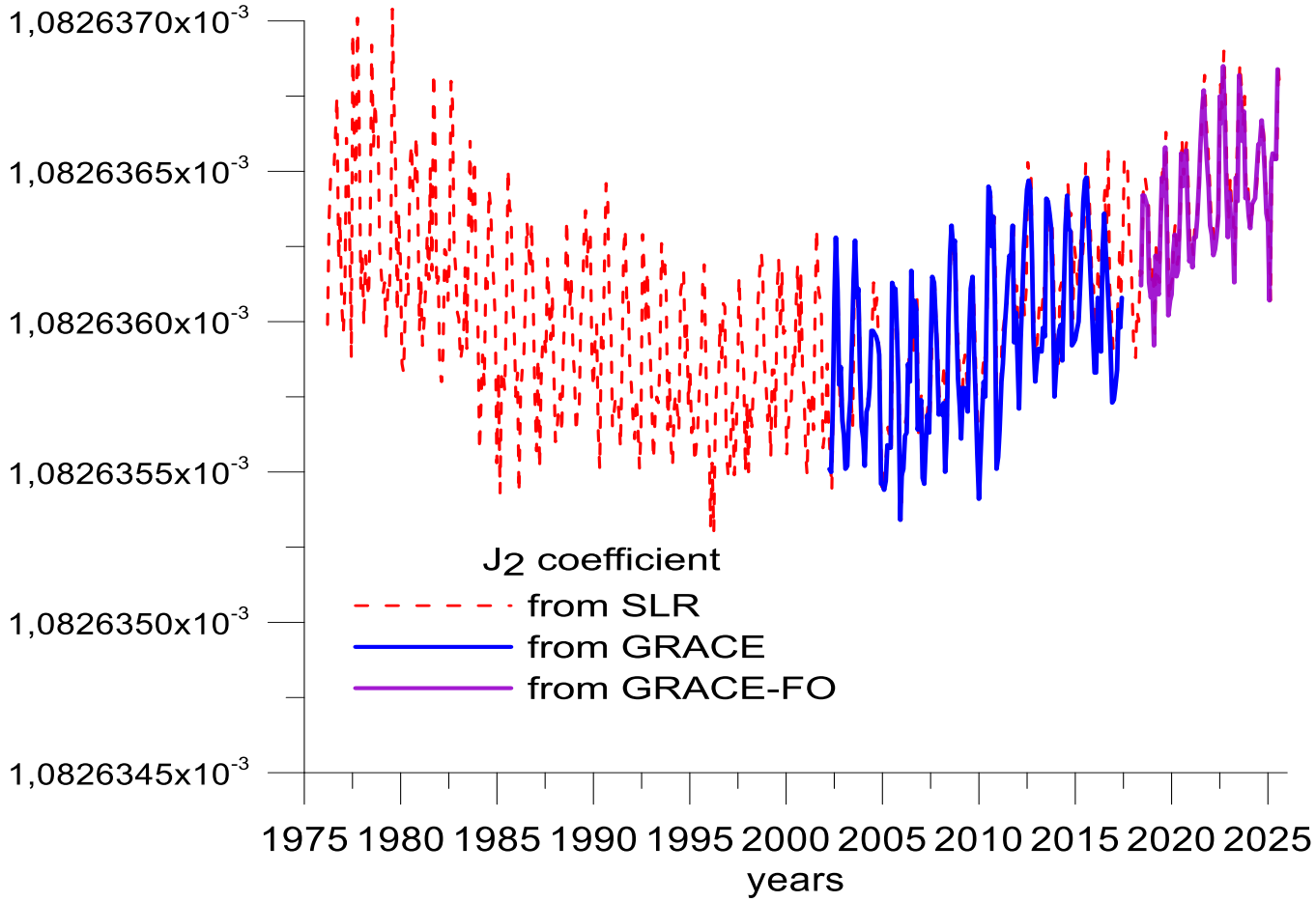


Fig. 2.26 The retrograde precession of a satellite orbit causes the line of nodes (CN_1, CN_2) to change position on successive equatorial crossings.



Изменения первых коэффициентов гравитационного поля

Data strength allows for reliable recovery of low-degree gravity

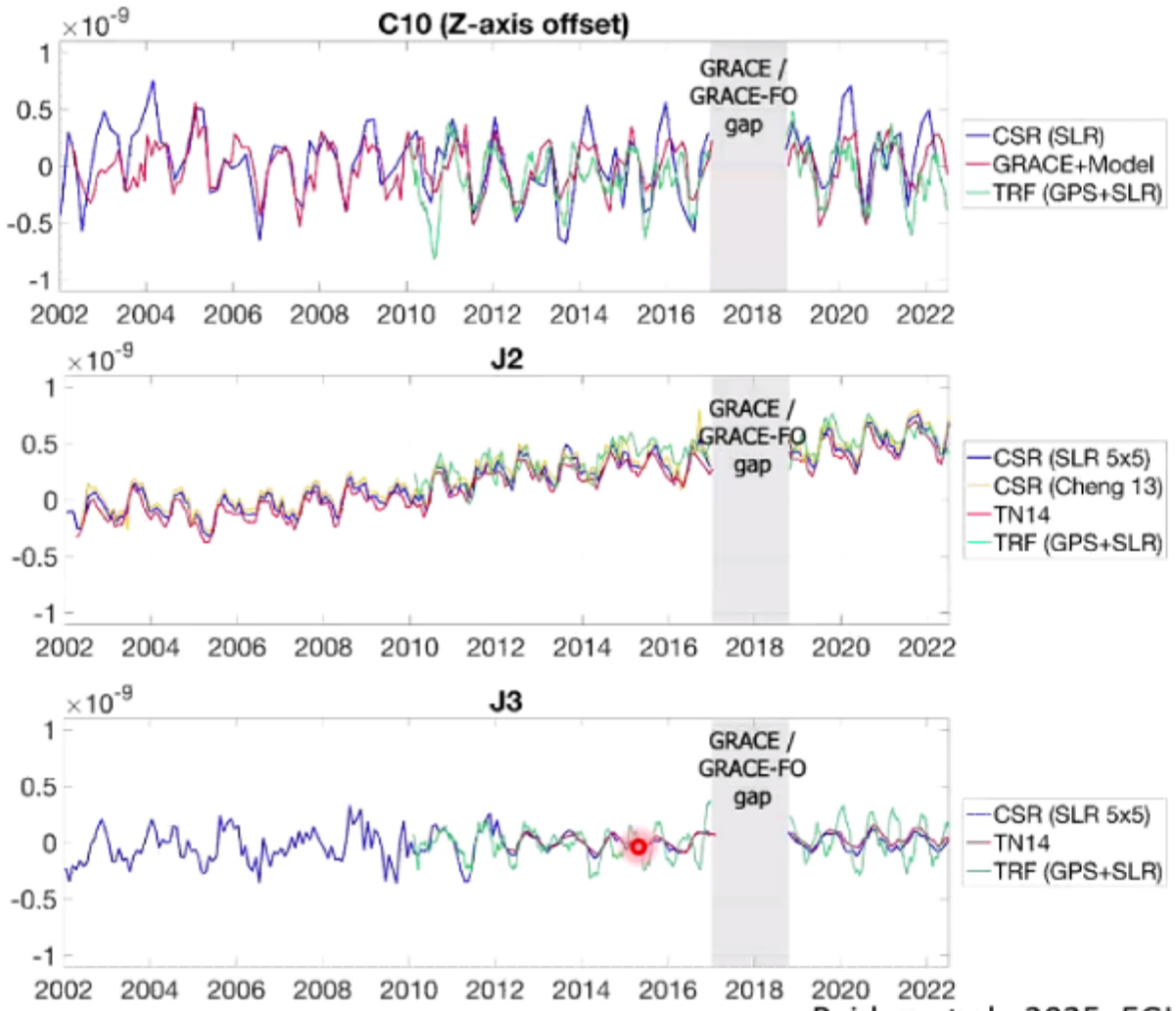
From the Haines et al., 2024 realization

Degree-1: Geocenter (X,Y,Z)

C10 (Z-axis): Most challenging to estimate. Satisfactory agreement in amplitude and phase (February).

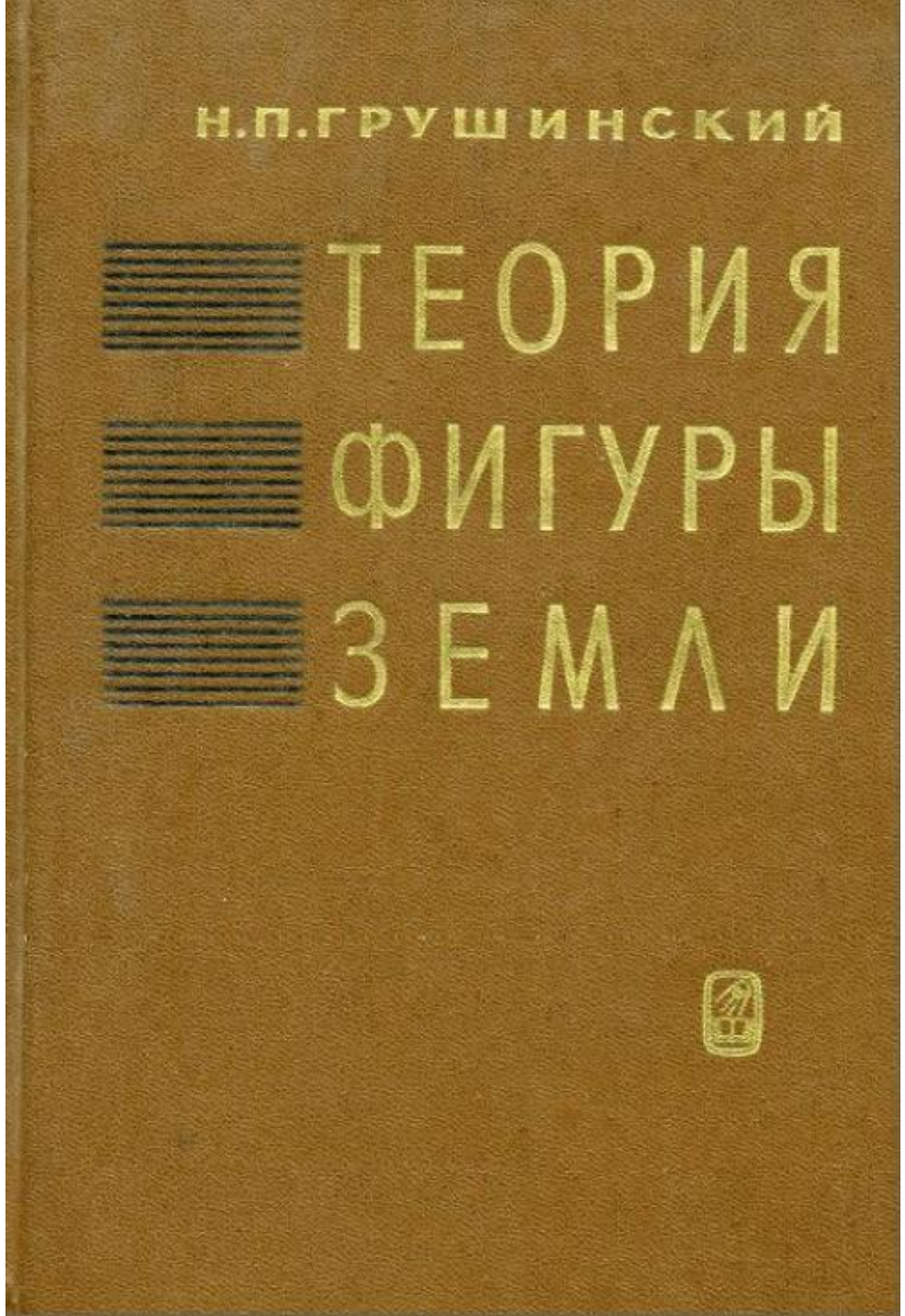
J2: Input and parametrization choices drive differences among different solutions.
TRF: SLR significantly improves J2 recovery (compared to a GPSonly solution).

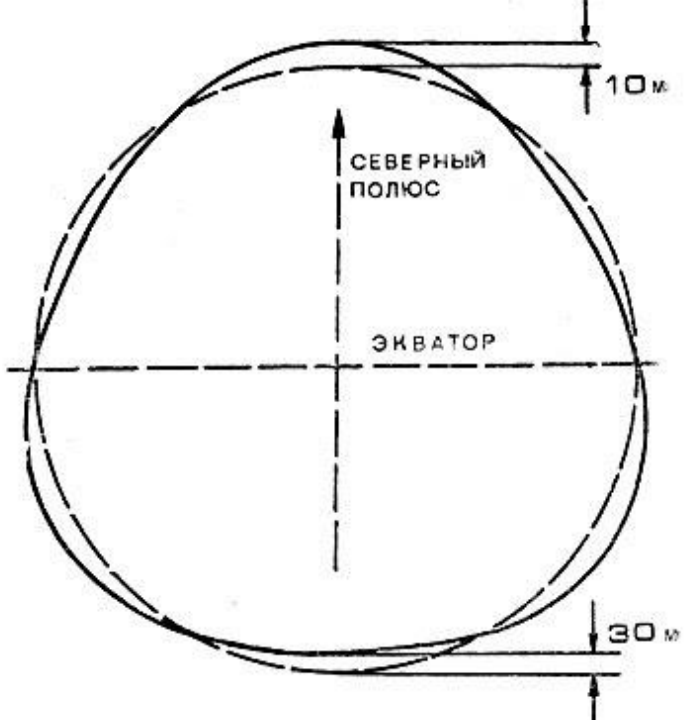
J3: In family with competing solutions. Addition of LARES expected to improve the amplitude. (soon!!!)

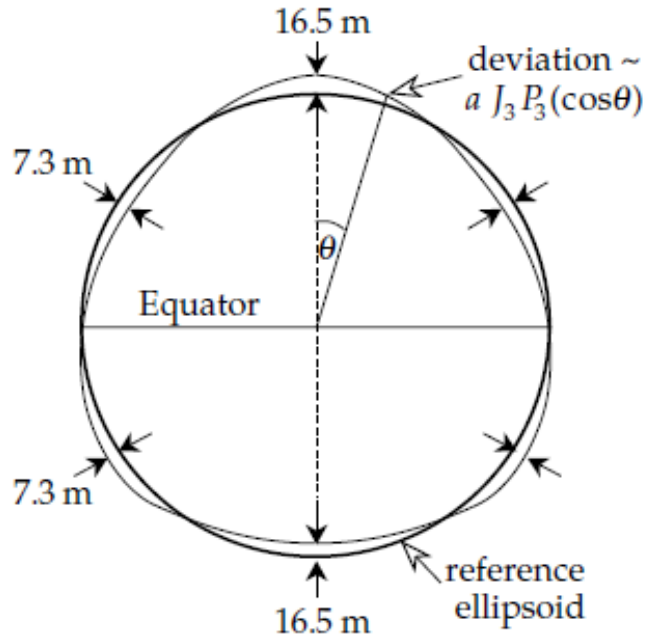


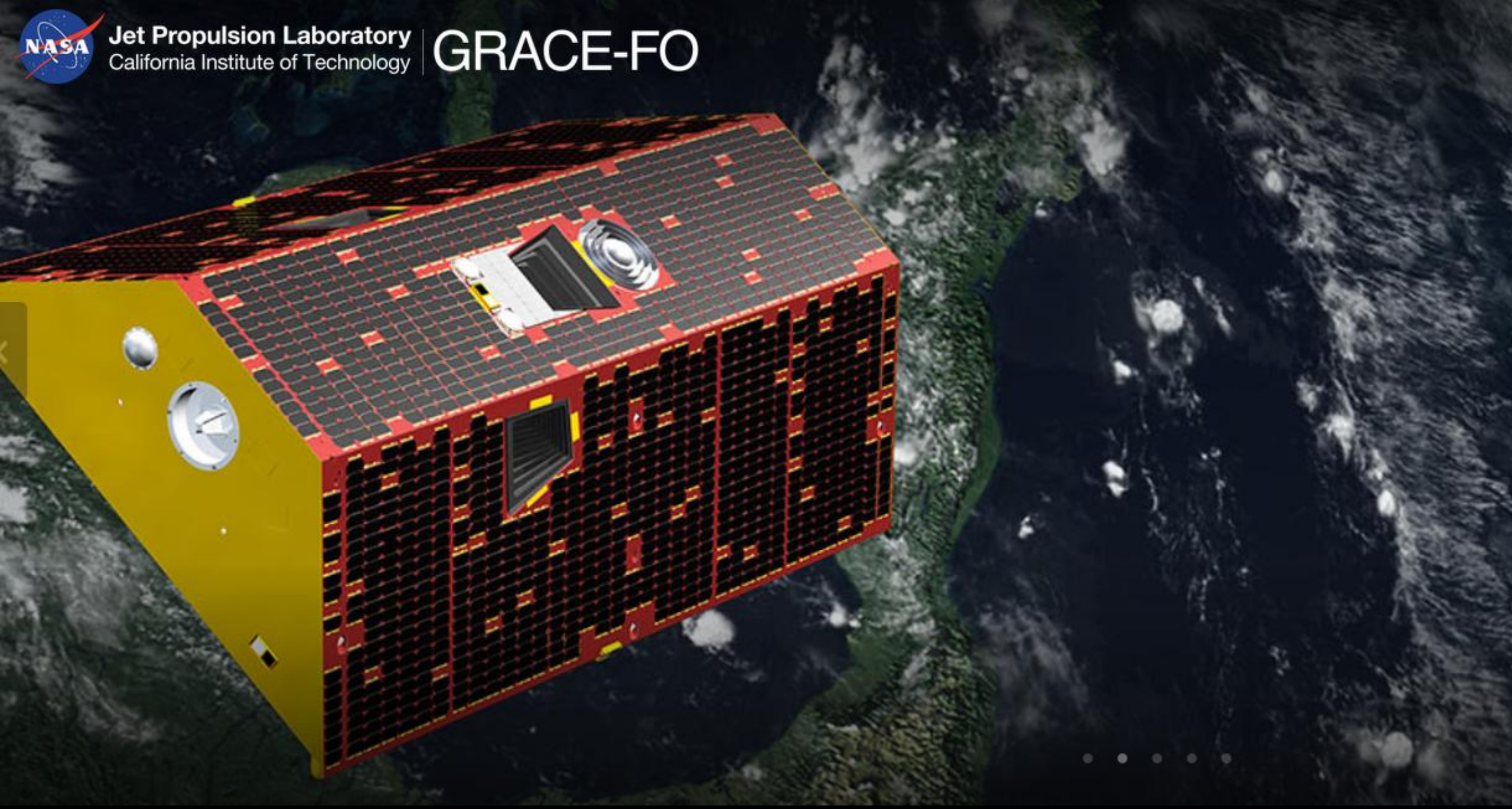
Peidou et al., 2025; EGU

Удалить закрепление
Claudio Abbondanza


Н.П.ГРУШИНСКИЙ
ТЕОРИЯ
ФИГУРЫ
ЗЕМЛИ


10 м
СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС
ЭКВАТОР
30 м


16.5 m
deviation ~
a J3 P3(cosθ)
7.3 m
θ
Equator
7.3 m
reference
ellipsoid
16.5 m


Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology
GRACE-FO

https://www.gstm-2026.eu 80%



GRACE/GRACE-FO Science Team Meeting 2026

The GRACE/GRACE-FO Science Team Meeting (GSTM) 2026 took place at the GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Potsdam, Germany, from 13 to 15 October 2026.

Session recordings for on-demand view: All registered participants have the opportunity to watch recordings of the oral sessions until 15 November 2026. Corresponding videos are linked as session materials when browsing the meeting programme.

The meeting was held in a **hybrid format** with a total number of **172** participants (on-site: 91, online: 81).

As usual, the GSTM2026 featured several topical sessions on specific themes. The program was composed of **75 oral presentations** (56 on-site, 19 online) and **15 posters** (available for on-site participants only).

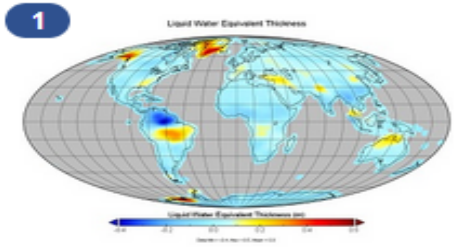
The meeting started with a detailed GRACE-FO Project Status session (A.1) providing an overview of the various activities and plans of the US-German GRACE-FO Science Data System in terms of data processing and mission operations. The following sessions covered the topics analysis techniques of GRACE/GRACE-FO mission data (A.2), the planned successor mission GRACE-C, ESA's Next Generation Gravity Mission

Данные в архиве

podaac
Physical Oceanography Distributed Active Archive Center

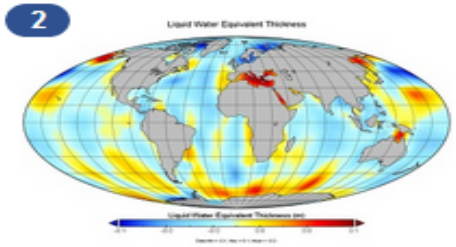
Prev 1 Next

1



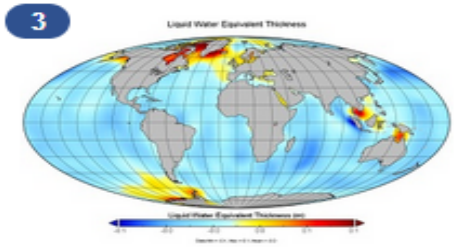
JPL TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly Release 6.0 in netCDF/ASCII/GeoTIFF Formats
(TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06_LND)
Ocean Pressure, GRAVITY/GRAVITATIONAL FIELD
Platform/Sensor: GRACE-FO/GRACE-FO ACC , GRACE-FO/GRACE-FO KBR , GRACE-FO/GRACE-FO SCA
Processing Level: 3
Longitude/Latitude Resolution: 1 degrees x 1 degrees
Start/End Date: 2018-May-22 to Present
Description: The JPL monthly land mass grids contain land water mass anomaly given as equivalent water thickness derived from GRACE time-variable gravity observations during the specified timespan ... more

2



CSR TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Ocean Bottom Pressure Anomaly Release 6.0 version 02 in netCDF/ASCII/GeoTIFF Formats
(TELLUS_GRFO_L3_CSR_RL06_OCN_v02)
GRAVITY/GRAVITATIONAL FIELD, OCEAN PRESSURE
Platform/Sensor: GRACE-FO/GRACE-FO ACC , GRACE-FO/GRACE-FO KBR , GRACE-FO/GRACE-FO SCA
Processing Level: 3
Longitude/Latitude Resolution: 1 degrees x 1 degrees
Start/End Date: 2018-May-22 to Present
Description: The CSR monthly ocean bottom pressure grids are given as equivalent water thickness changes derived from GRACE-FO time-variable gravity observations during the specified timespan in ... more

3



JPL TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Ocean Bottom Pressure Anomaly Release 6.0 version 02 in netCDF/ASCII/GeoTIFF Formats
(TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06_OCN_v02)
GRAVITY/GRAVITATIONAL FIELD, OCEAN PRESSURE
Platform/Sensor: GRACE-FO/GRACE-FO ACC , GRACE-FO/GRACE-FO KBR , GRACE-FO/GRACE-FO SCA
Processing Level: 3
Longitude/Latitude Resolution: 1 degrees x 1 degrees
Start/End Date: 2018-May-22 to Present
Description: The JPL monthly ocean bottom pressure grids are given as equivalent water thickness changes derived from GRACE-FO time-variable gravity observations during the specified timespan in ... more

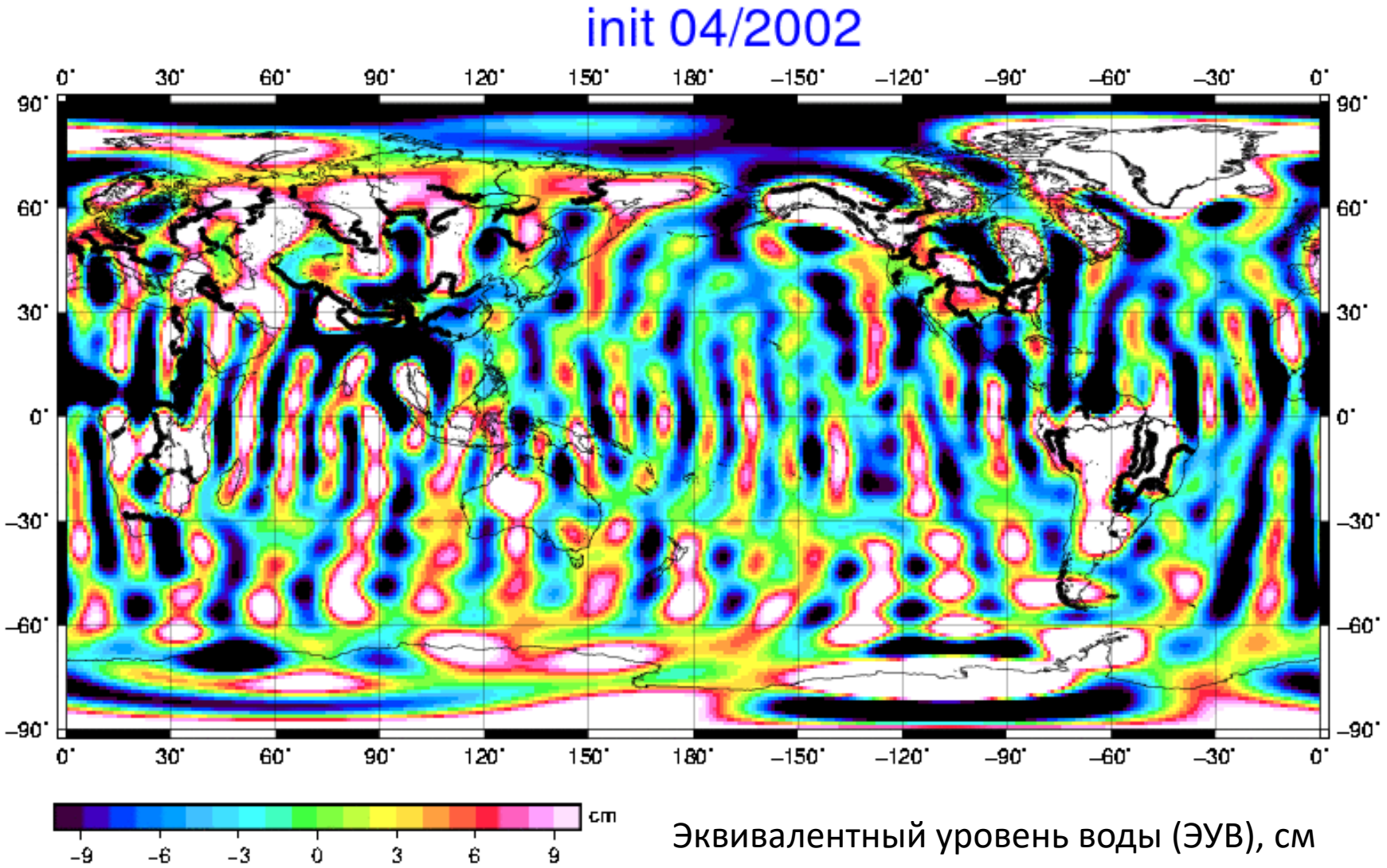
Обработка данных GRACE

Мы используем данные L2 релиза 6.3 и 7, обработанные JPL в виде ежемесячных файлов с коэффициентами Стокса разложения гравитационного поля Земли C и S до 60-й степени и порядка

Аномалии гравитационного поля переводятся в значения эквивалентного уровня воды (ЭУВ) плоского слоя

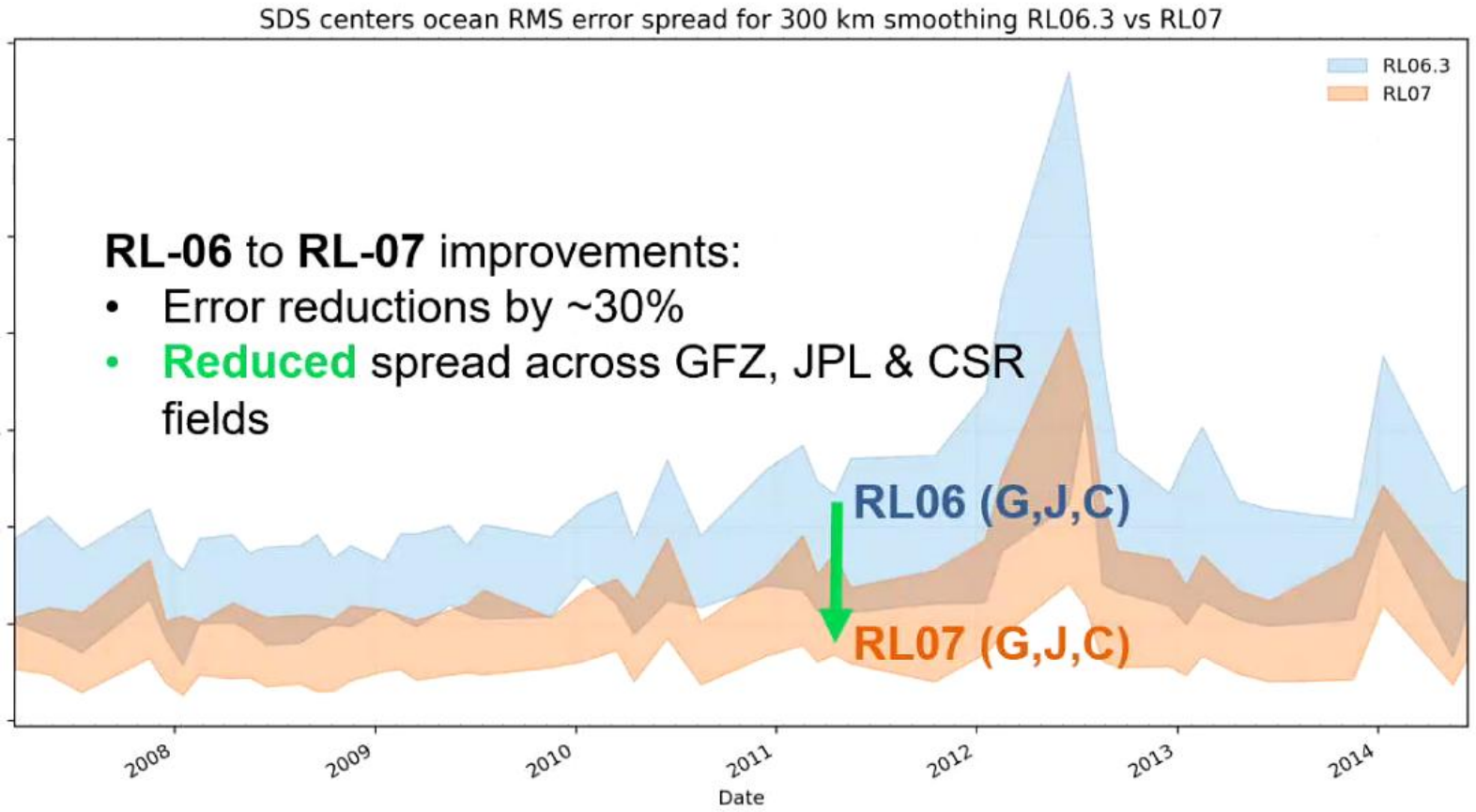
$$\Delta h(\varphi,\lambda,t)=\frac{a\rho_{ave}}{3\rho_{w}}\sum_{n=2}^{60}\sum_{m=0}^{n}\frac{2n+1}{1+k_{n}}W_{n}(\Delta C_{nm}(t)\cos m\lambda+\Delta S_{nm}(t)\sin m\lambda)P_{n}^{m}(\sin\varphi)$$

Исходные данные GRACE JPL RL06 Уровня 2



Эквивалентный уровень воды (ЭУВ), см

Project SDS teams have initiated the 1st release of the final GRACE reprocessed data (L1: V05f; L2: RL07)



GRACE

- 2004 – 2017 are completed
  - First L-2 fields already available on *NASA EarthData* for testing
- 2002 – 2003 expected to be done by end of Nov'26
- Complete L-1 & L-2 release of GRACE (2002 – 2017) by Dec'26

GRACE-FO

- L1 reprocessing:
  - IGS20 POD & ACC transplant re-calibrations (in progress)
- L-2:
  - Updated force models & stochastic noise models
- Goal: Q2 '27 (L-1); Q3 '27 (L-2)

Многоканальный сингулярный спектральный анализ

1) Параметр задержки (лага) *L*

МССА- обобщение МГК

Многоканальный сигнала

$$x = (x_1, x_2, \ldots, x_N)$$

вкладывается в траекторную матрицу X

2) SVD — сингулярное разложение матрицы

1D-CCA – “Гусеница”

$$X = USV^T$$

3) Для каждого сингулярного числа s_i восстанавливается матрица

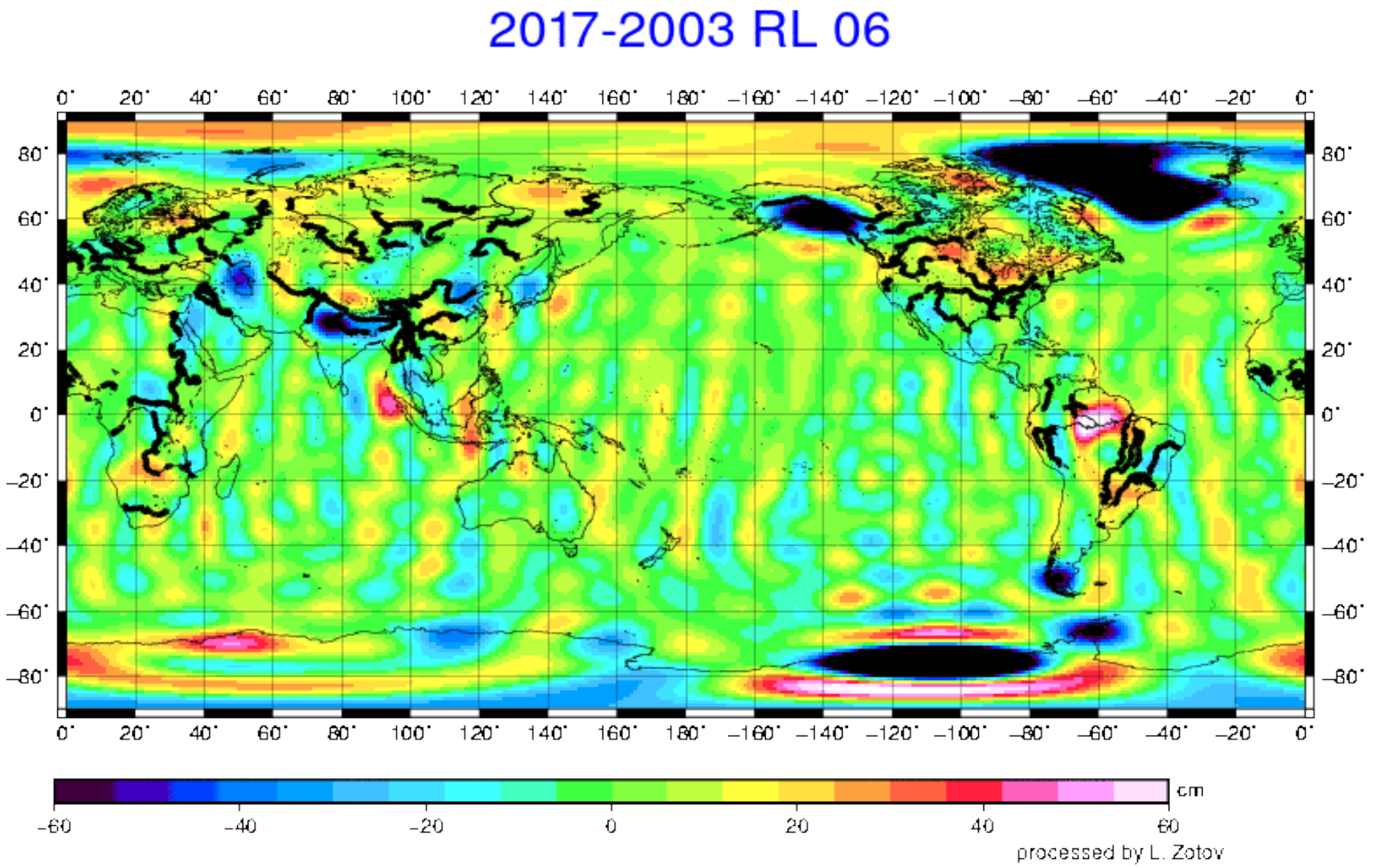
$$X^i = s_i u_i v_i^T ,$$

И усреднением вдоль побочных диагоналей (Генкелизацией) восстанавливается компонента сигнала

4) Сходные сигналы группируются в Главные Компоненты (Principal Components)

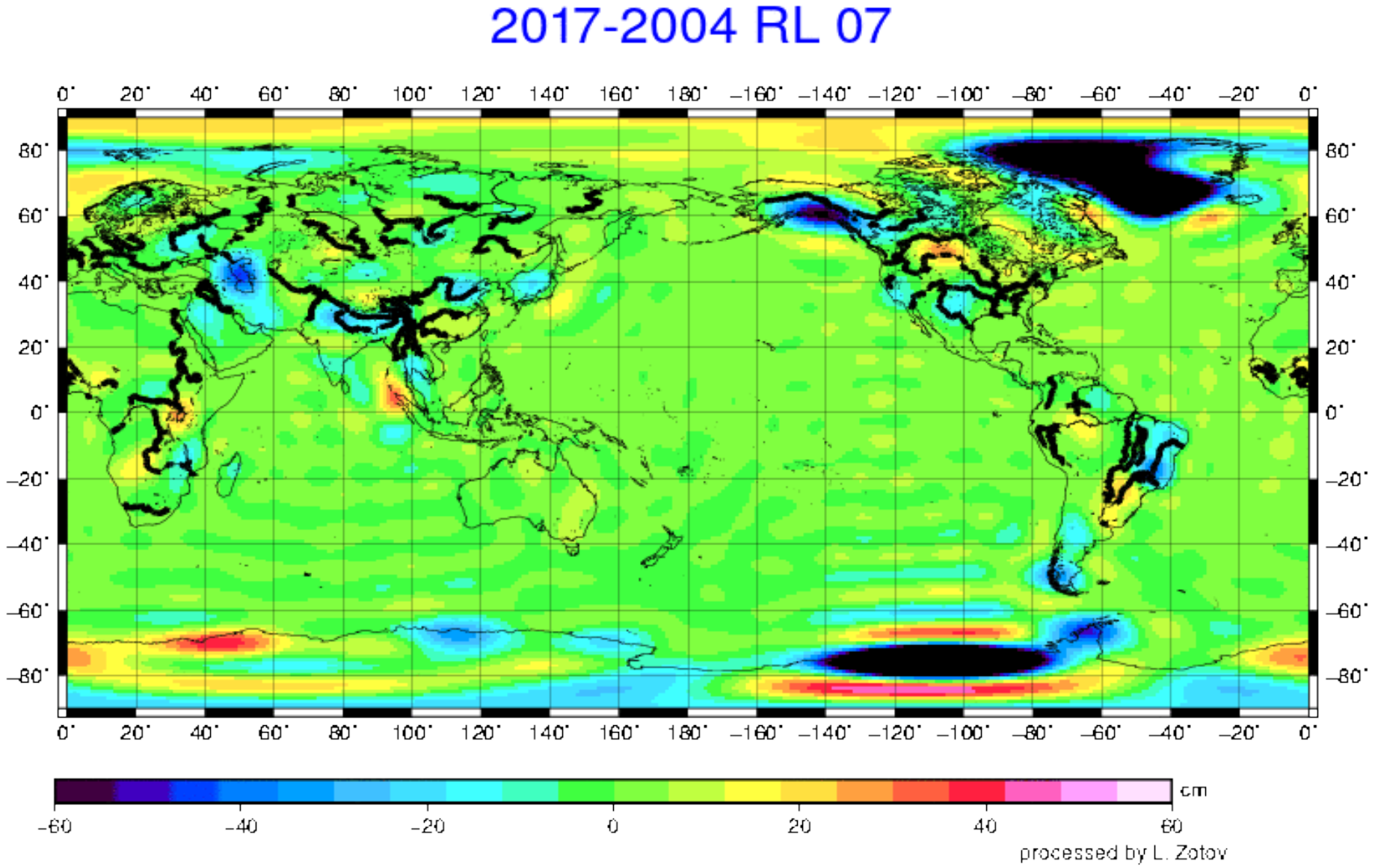
PC1, PC2, PC3…

Климатические тренды в данных миссии GRACE



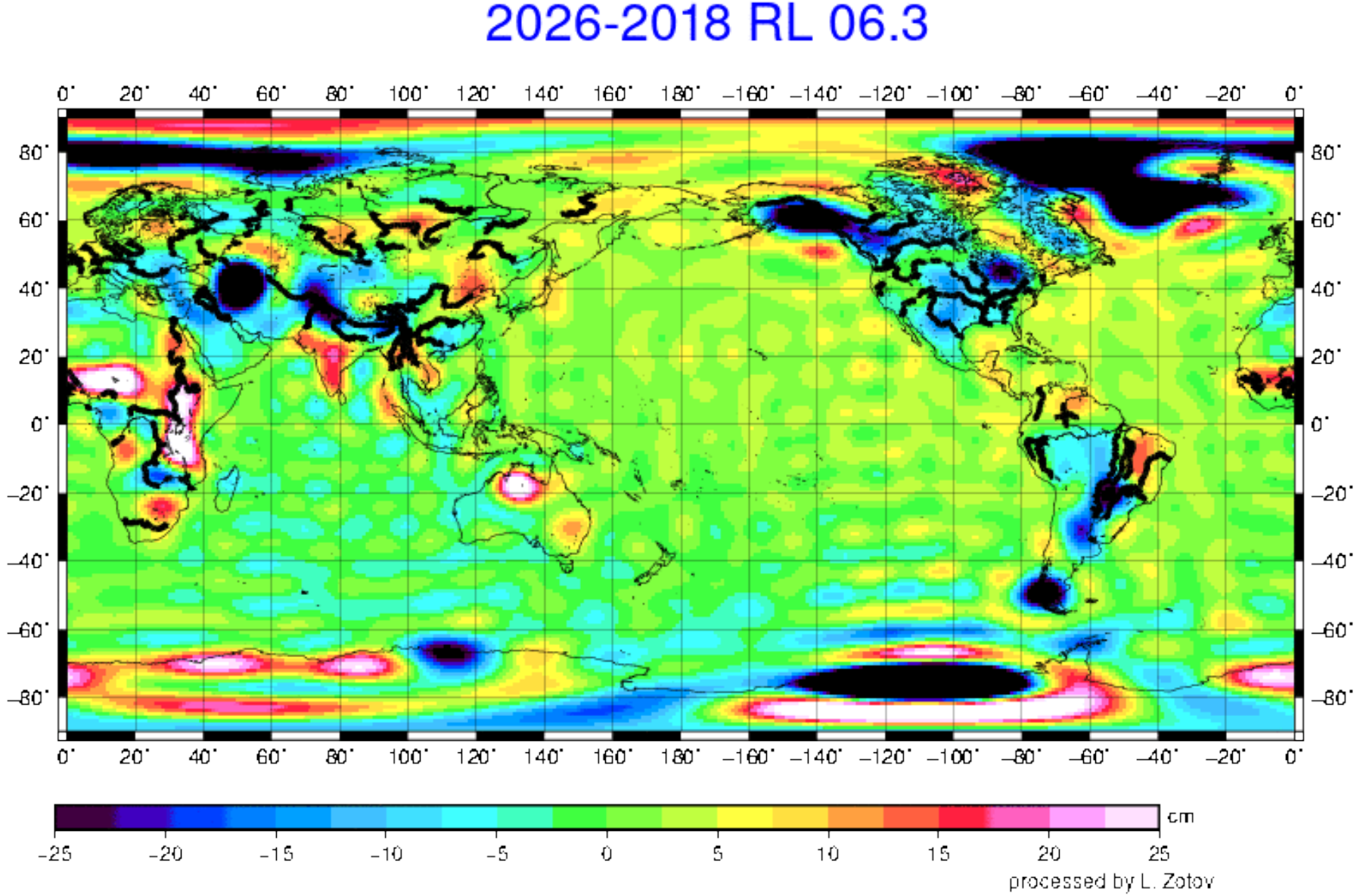
Изменения масс вследствие климатических и других факторов

Климатические тренды в данных миссии GRACE



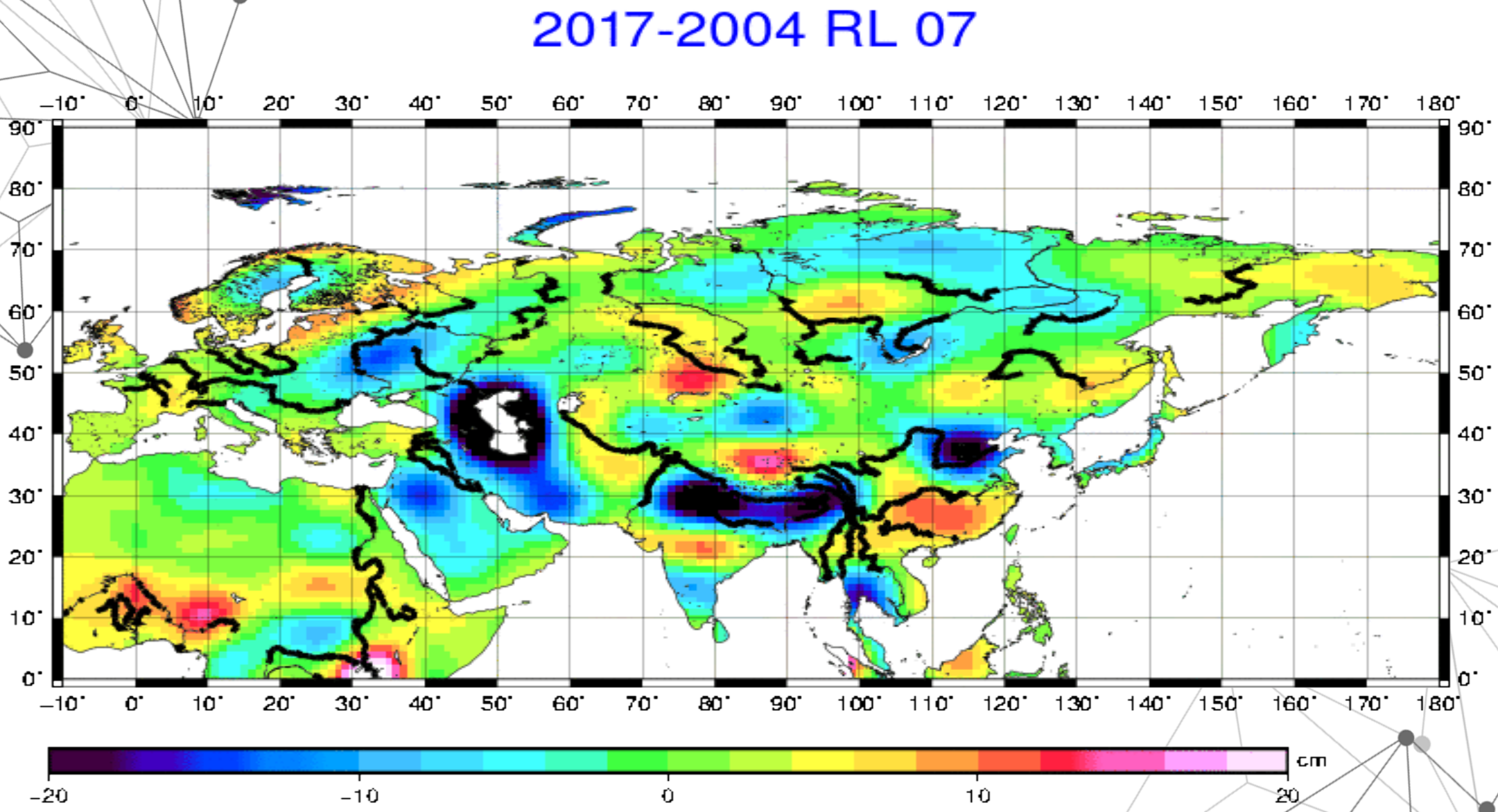
Изменения масс вследствие климатических и других факторов

Климатические тренды в данных миссии GRACE-FO

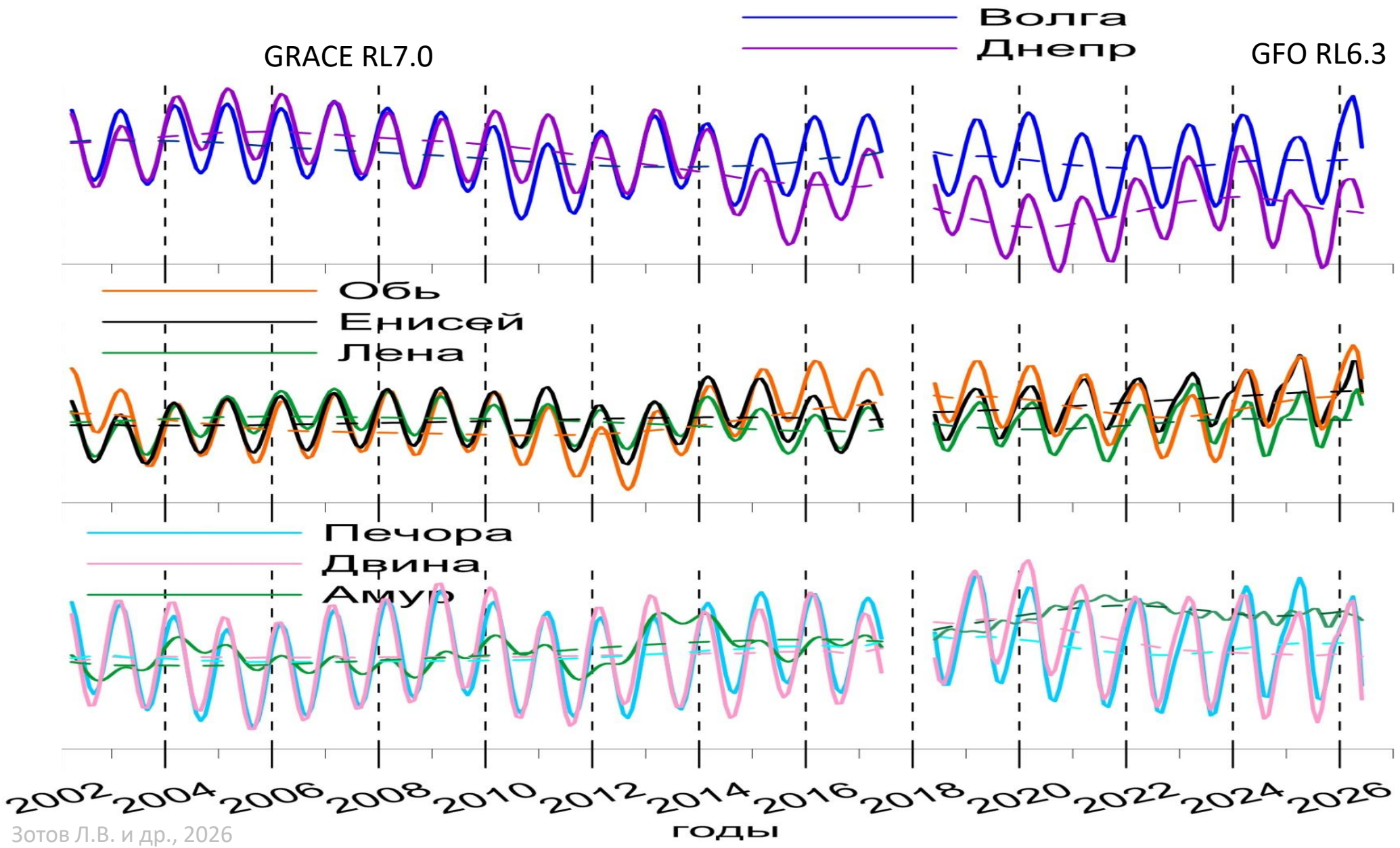


Изменения масс вследствие климатических и других факторов

Тренды изменения масс с 2003 по 2017 год по данным GRACE



Изменения масс в бассейнах рек России



Зотов Л.В. и др., 2026

Статья в Журнале Природа N 5 за апрель 2016 г



***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 (C.K.Shum)**, 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.*

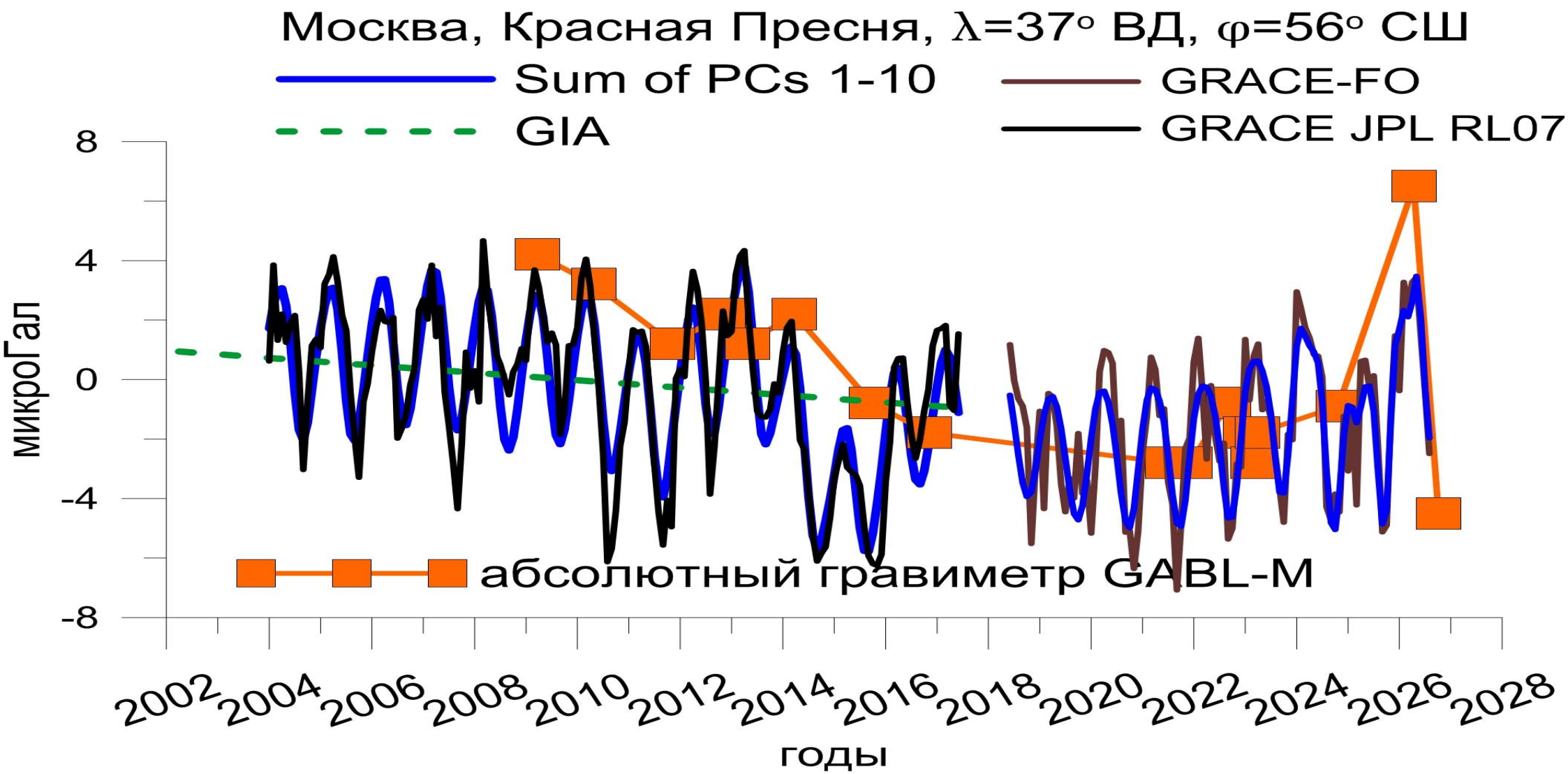


3 **Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Шам С.К.**

Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России

Спутниковая система GRACE, действующая на орбите Земли с 2002 г., позволяет изучать гравитационные аномалии и их временные вариации, обусловленные процессами массопереноса в оболочках Земли. На основе анализа гравитационных отклонений, зарегистрированных с помощью спутников GRACE, удалось оценить изменчивость влагозапаса бассейнов 15 крупнейших рек России за последние 13 лет.

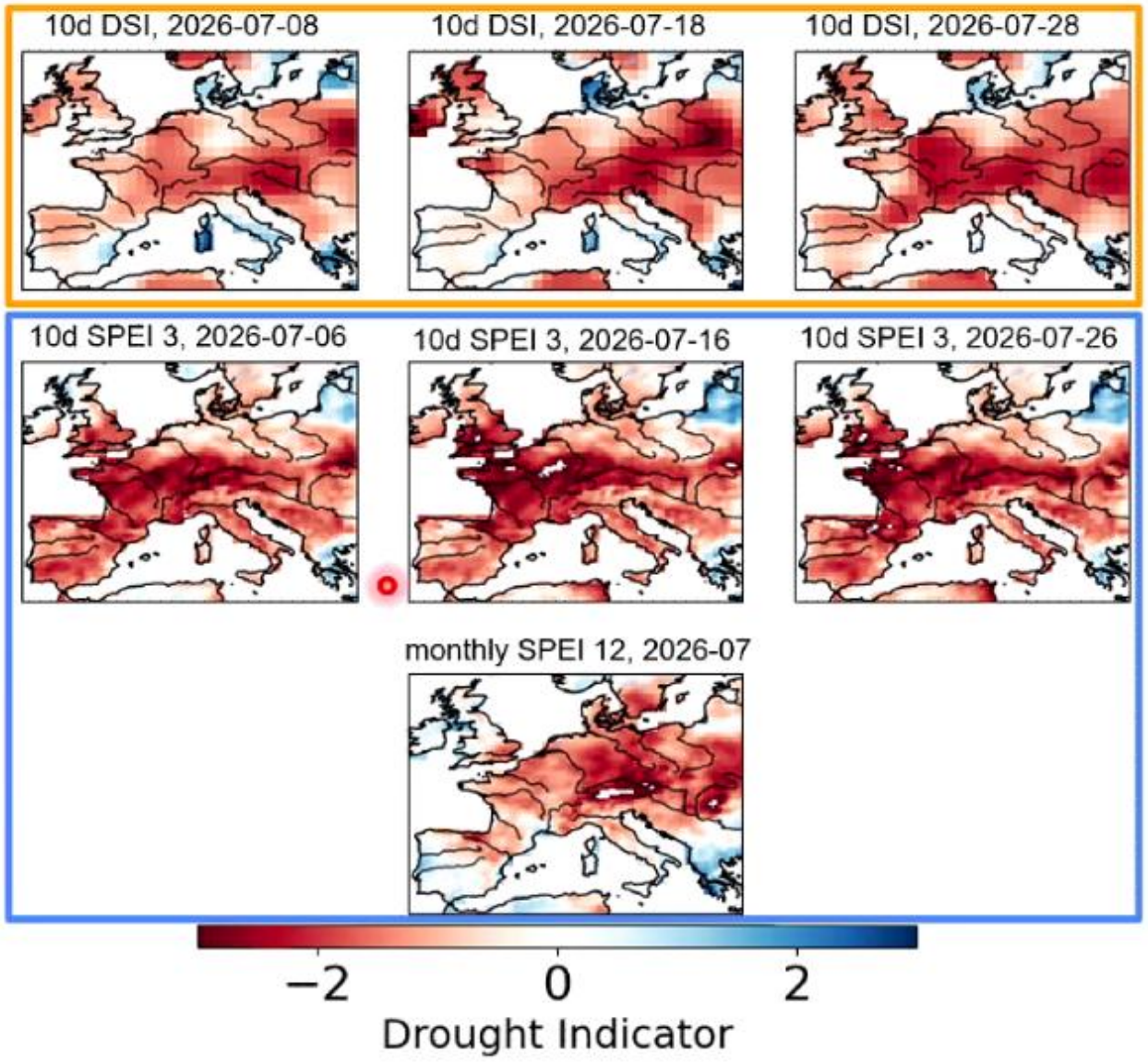
Измерения абсолютным гравиметром в Москве на Красной Пресне в сравнении с данными космической гравиметрии



Измерения Юшкин, Фадеев, Зотов

Comparison to other drought indicators

Comparison to other drought indicators : drought in Europe, July 2026





GRACE-DSI





SPEI : Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

→based on net precipitations

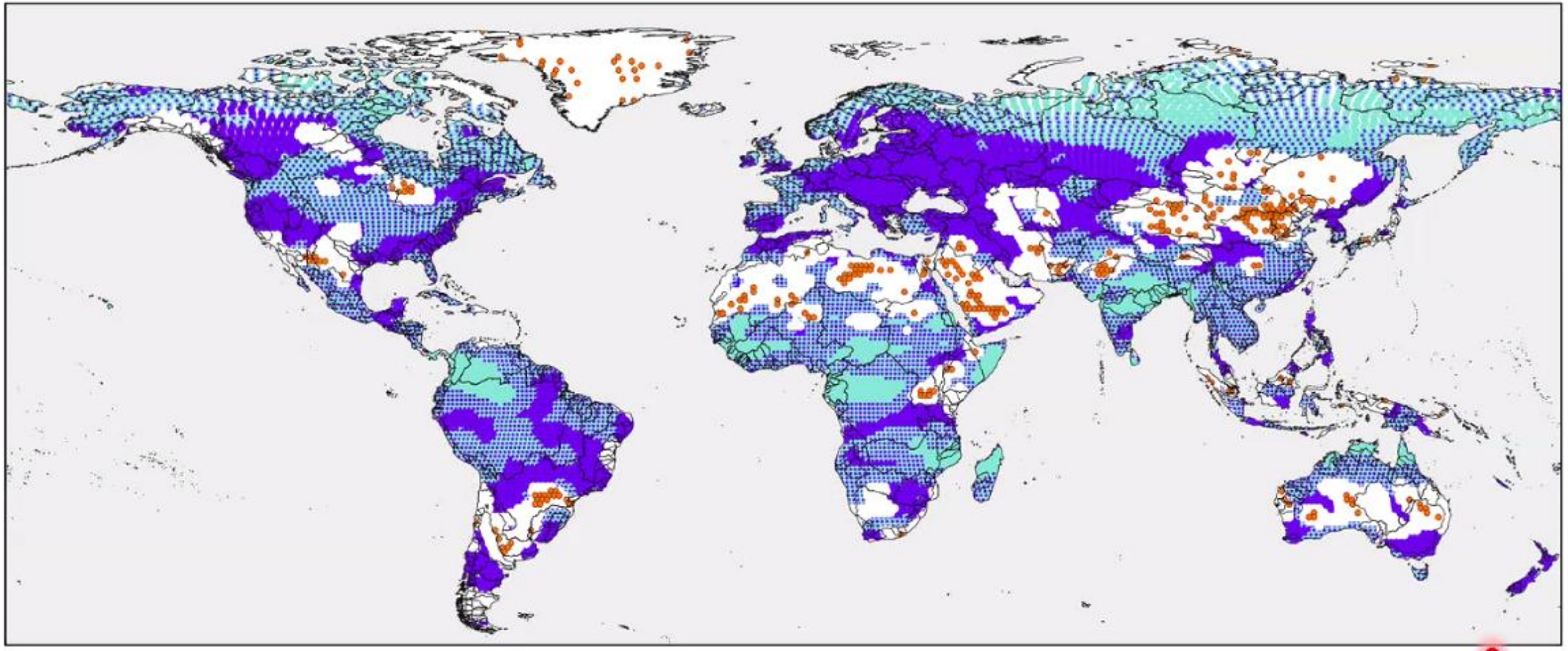
→aggregated over various time scales

→10-day SPEI 3 (short term)

→monthly SPEI 12 (long term)

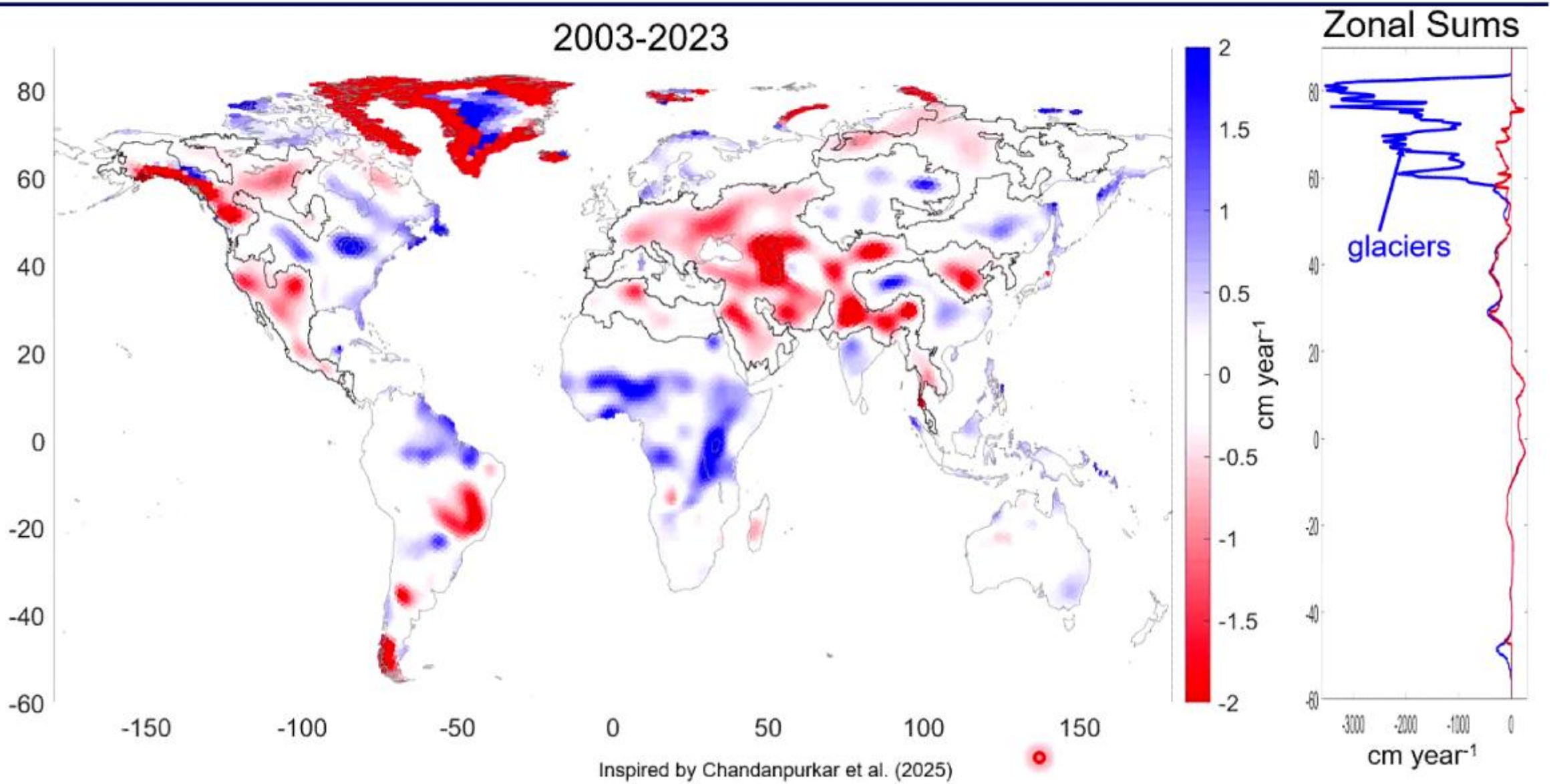
→ source : Global Drought Observatory

Where Is the Seasonal Cycle of TWS Sinusoidal?



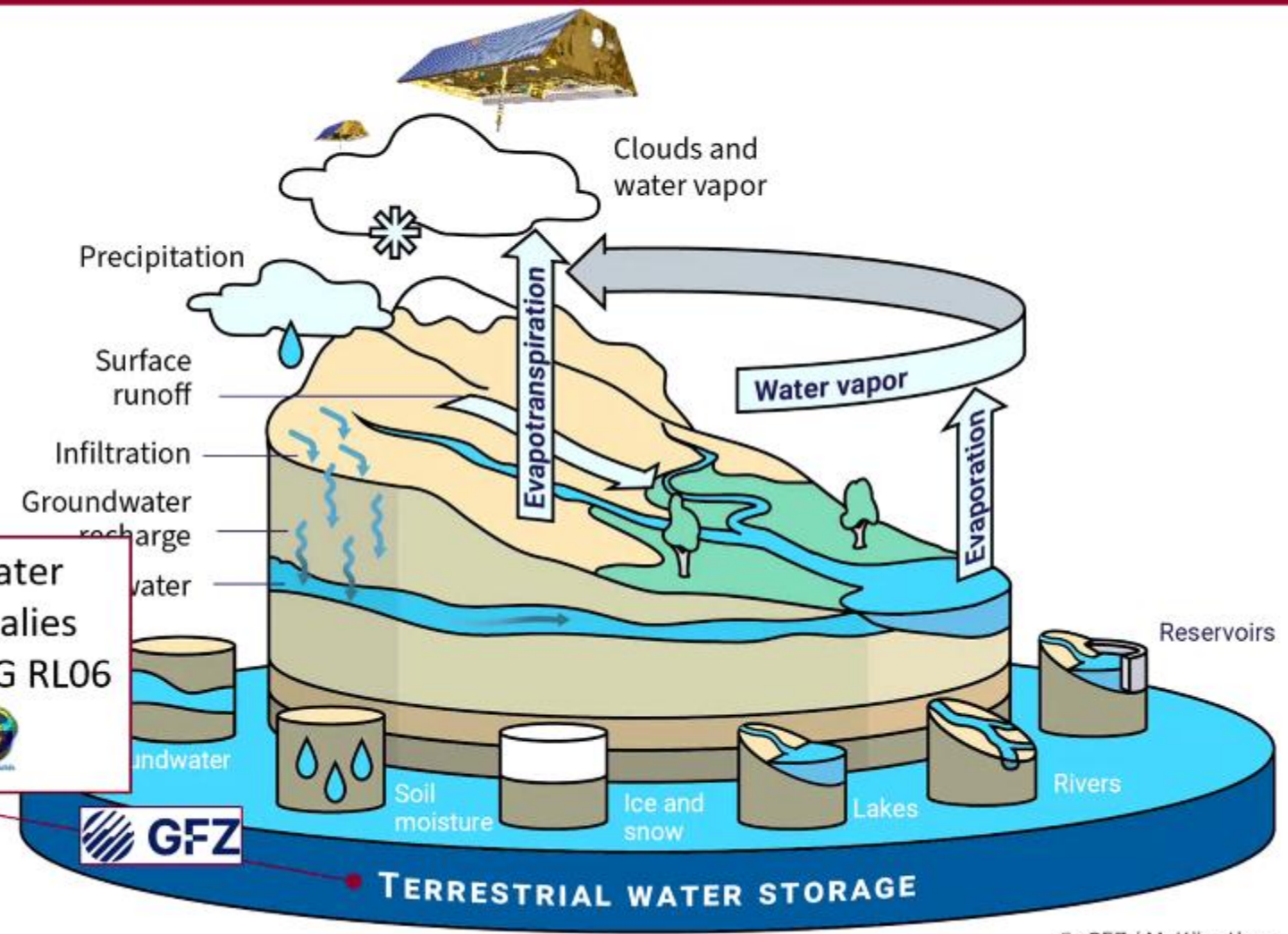
GODDARD EARTH SCIENCES

Drying and Wetting Trends observed by GRACE/-FO



Climate Change

Observation method

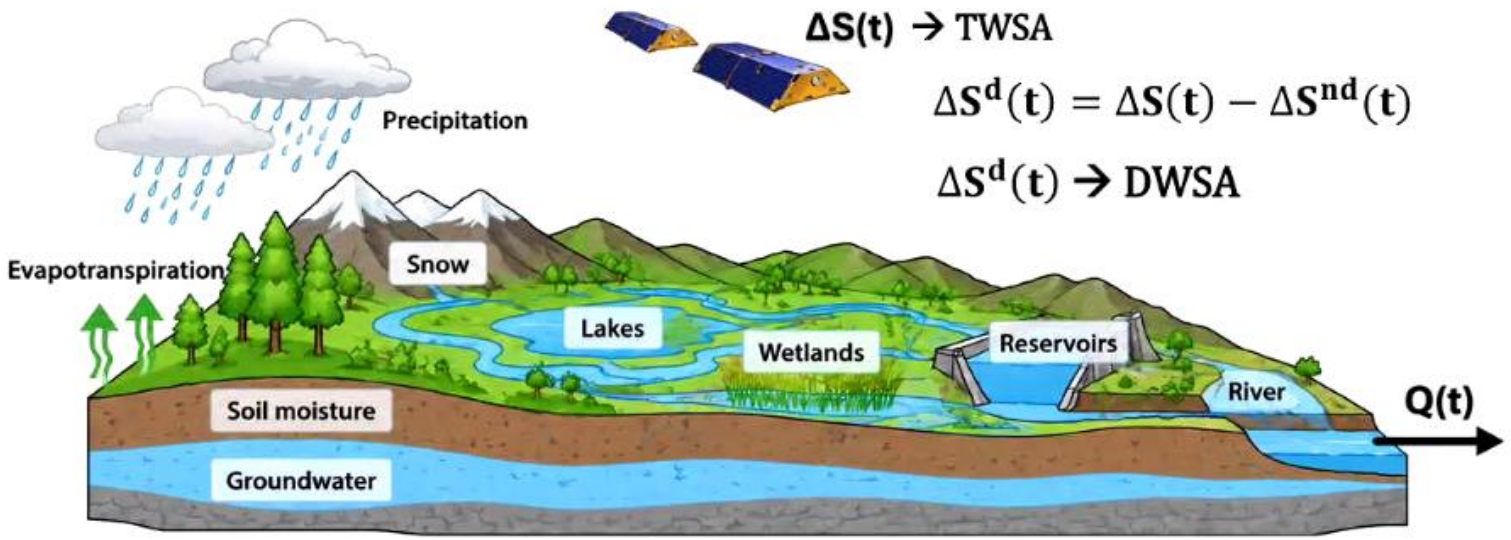


Terrestrial Water Storage Anomalies based on COST-G RL06

COST-G

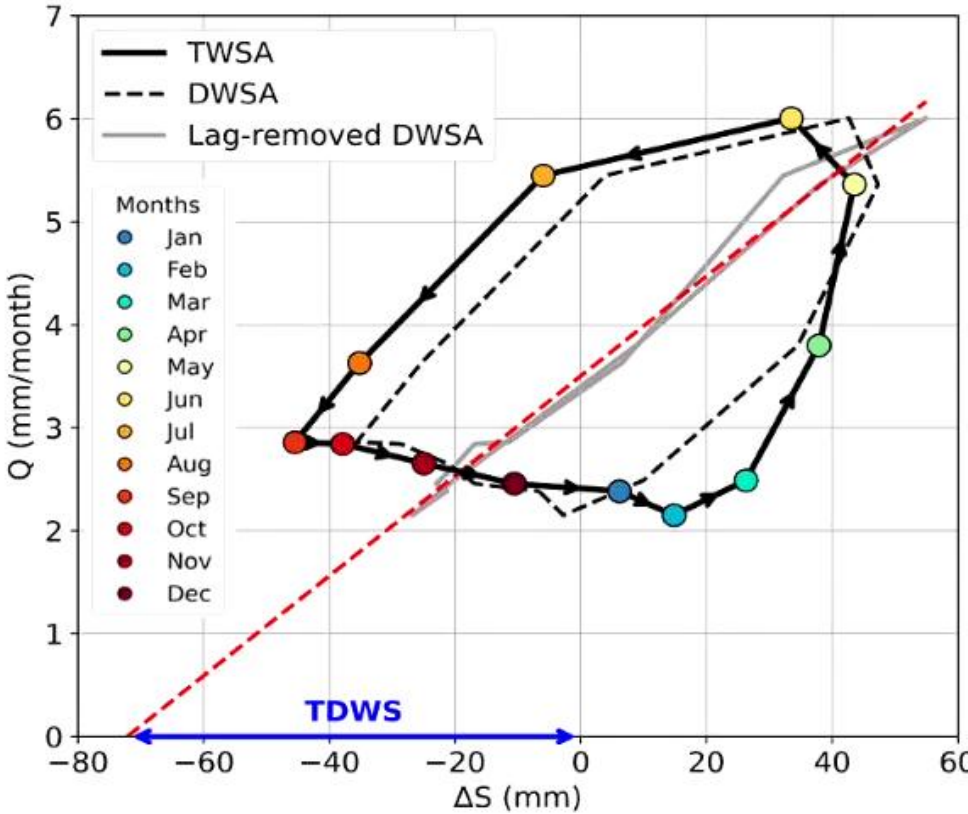
GFZ

Total Drainable Water Storage (TDWS) from Satellite Gravimetry



$$Q(t) = \frac{1}{\tau^{d}}\left(S_0^{d} + \Delta S^{d}(t+\Delta t)\right) = \frac{1}{\tau^{d}}\left(S_0^{d} + \Delta S_{\phi}^{d}(t)\right)$$

(Riegger & Tourian 2014, Tourian et al. 2018, 2023)



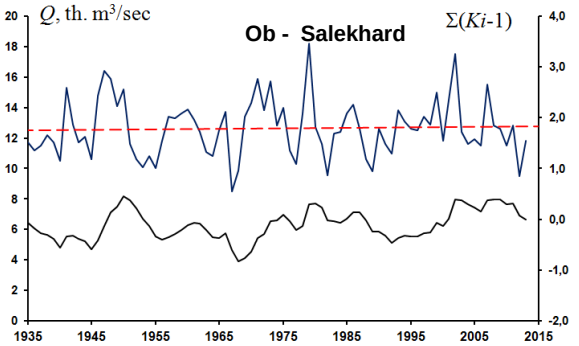
Runoff-Storage relationship
(Example of the Missouri river basin)

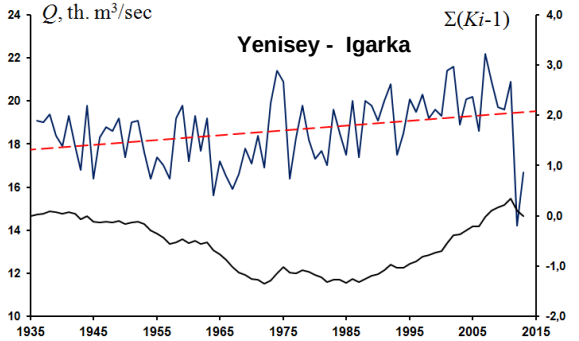
Долговременные изменения годового стока рек

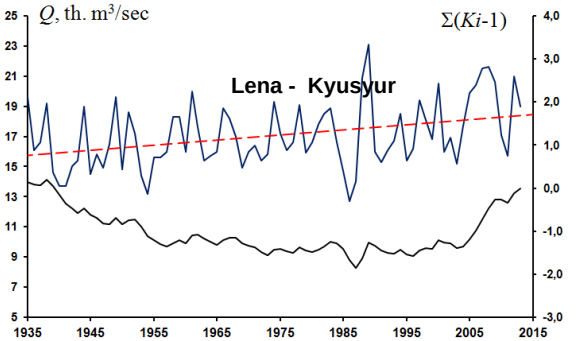
River – hydrometric station	$\Delta W_Q/\Delta y$*	The linear trend coefficient, km³/1year	
		1935-2013	1975-2013
Sev.Dvina - Ust-Pinega	+5.3%/+15mm	+0.098	+0.091
Mezen - Malonisogorskaya	-1.7%/-6mm	+0.005	+0.029
Pechora - Ust-Tsilma	+4.6%/+20mm	+0.173	+0.184
Ob - Salekhard	-0.4%/-0.7mm	+0.089	-0.089
Yenisey - Igarka	+5.4%/+13mm	+0.696	+0.922
Olenek - Sukhana	+12.2%/+21mm	+0.066	+0.113
Lena - Kyusyur	+7.4%/+16mm	+1.080	+2.214
Yana – Jiangky/Yubileynaya	*+12.8%/+18mm*	-	-
Kolyma - Srednekolymsk	+4.6%/+9mm	+0.081	+0.451

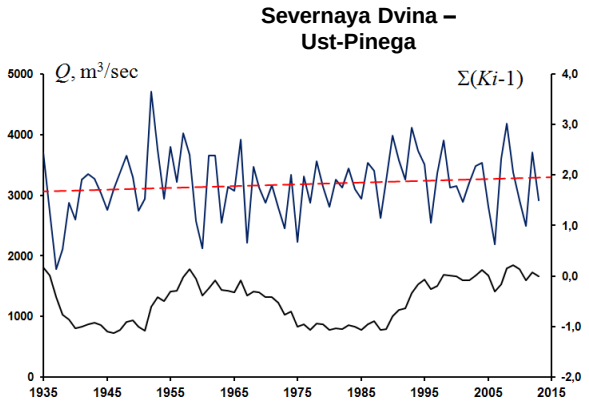
Изменения годового стока за 1976-2013 в сравнении со стоком за 1935-1975

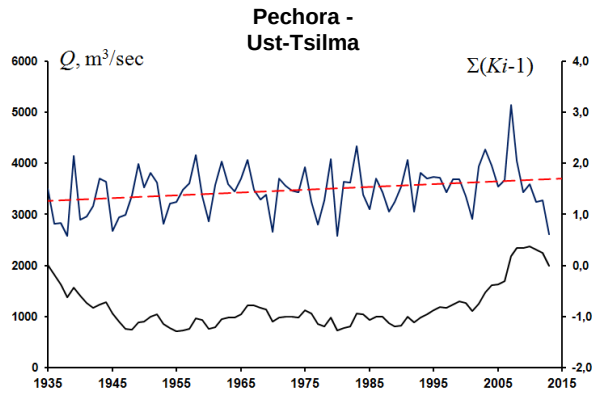
Данные Н.Л. Фроловой

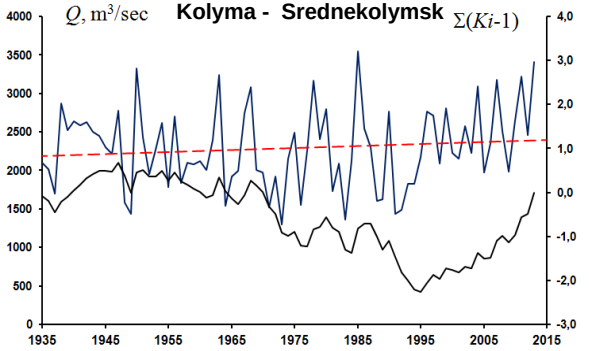




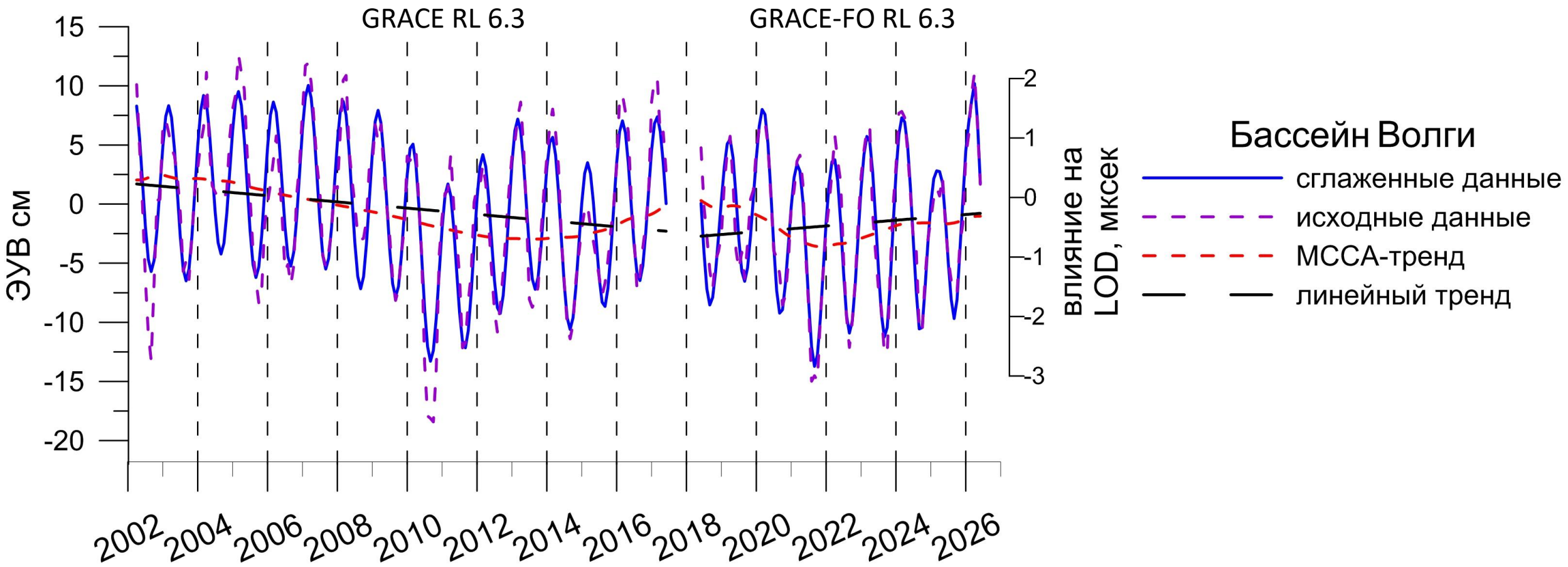




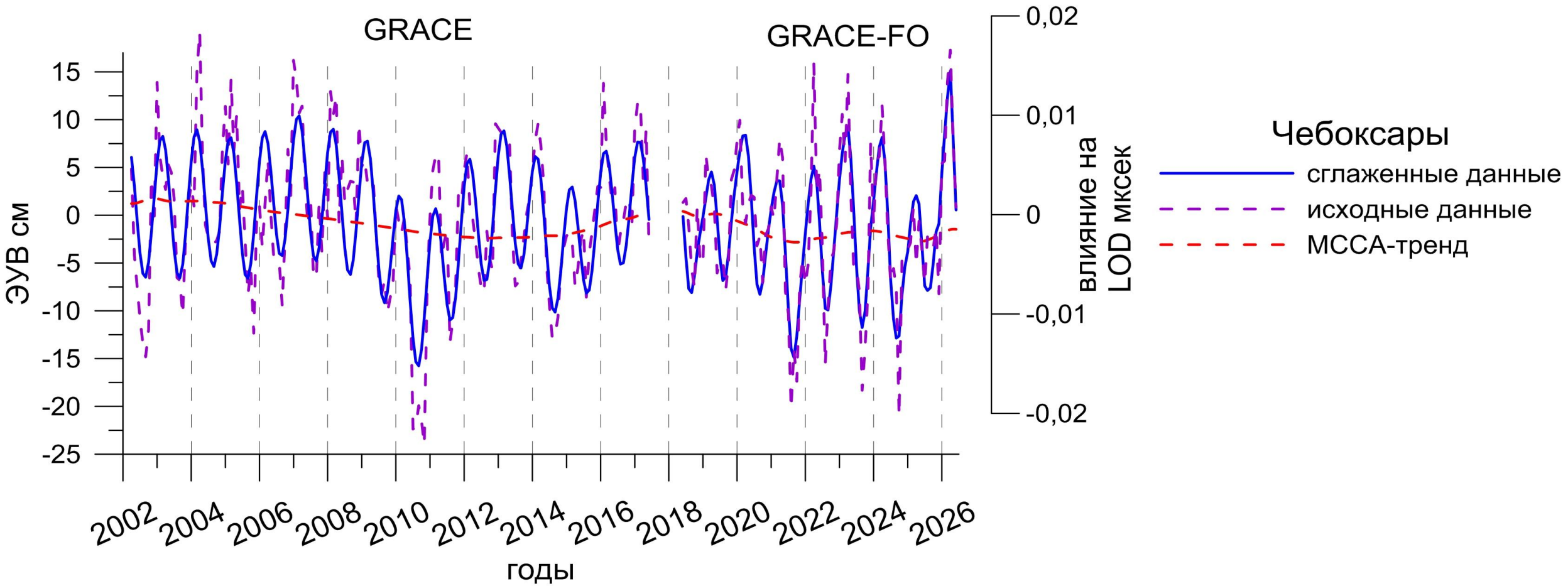




Изменения масс в бассейне Волги



Изменения масс в Чебоксарах



Вычисление влияния масс в Чебоксарах на вращение Земли

1) 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) получаем аномальную массу 1,1*10^{12} кг (1.1 Гт).

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

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)

Методика вычислений влияния на длительность суток LOD

3) Элементы, вычисленные в пункте б) для каждой ячейки 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.

4) Вычислить изменения длительности суток в секундах

$$3)\ \ \Delta LOD = 2\pi k \frac{\Delta I_{33}}{I_{33}\Omega},$$

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 на LOD (увеличение) составило 1,44*10^{-8} сек.

Методика вычислений влияния на длительность суток LOD

5) Вычислить компоненты возбуждающих функций для движений полюса как

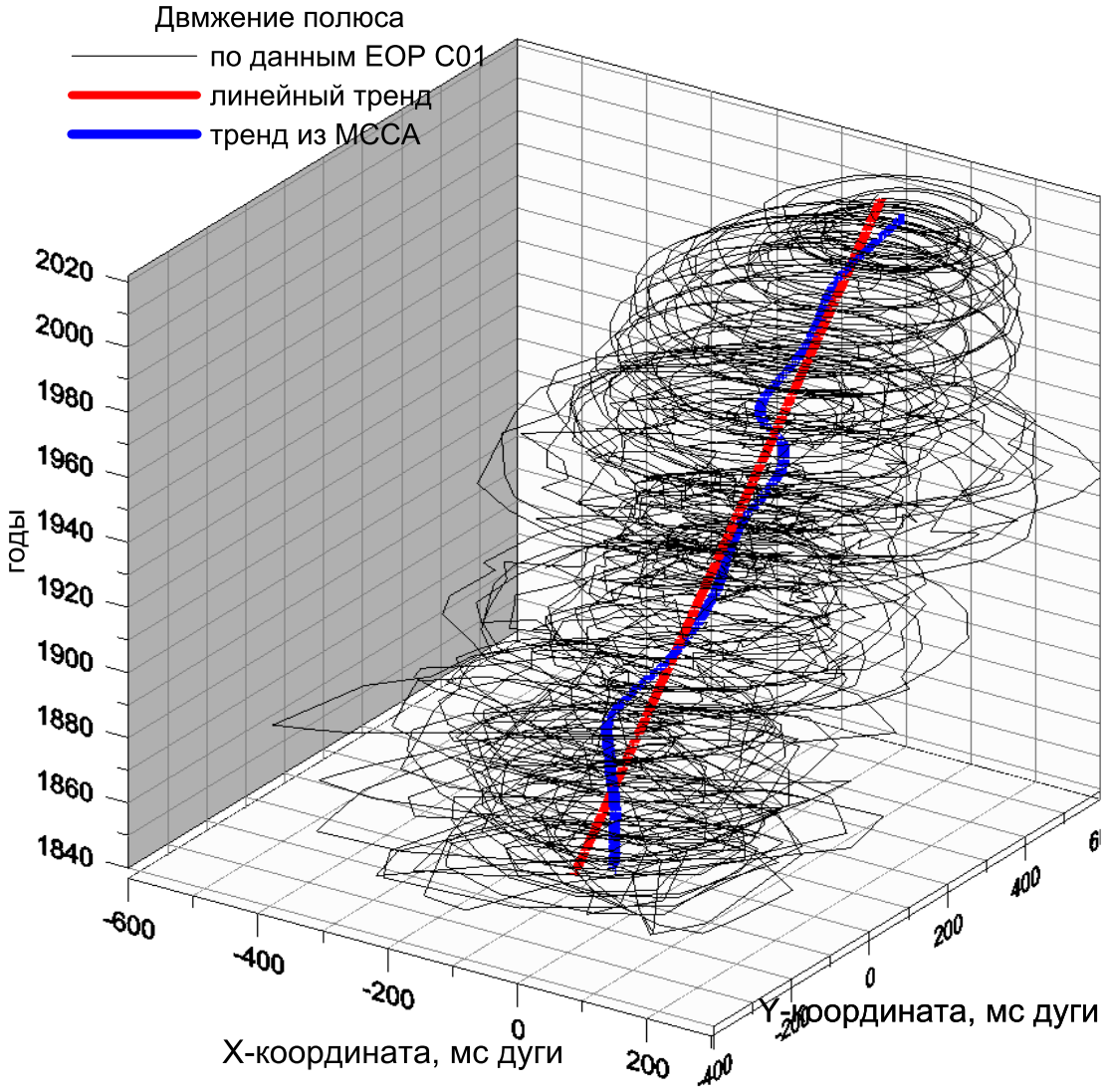
$$[\chi_1, \chi_2] = -\frac{1.098\sqrt{5}\, a_e^2 M_e}{\sqrt{3}(1+k_2')(I_{33}-\frac{I_{11}+I_{22}}{2})}[\Delta C_{21}, \Delta S_{21}],$$

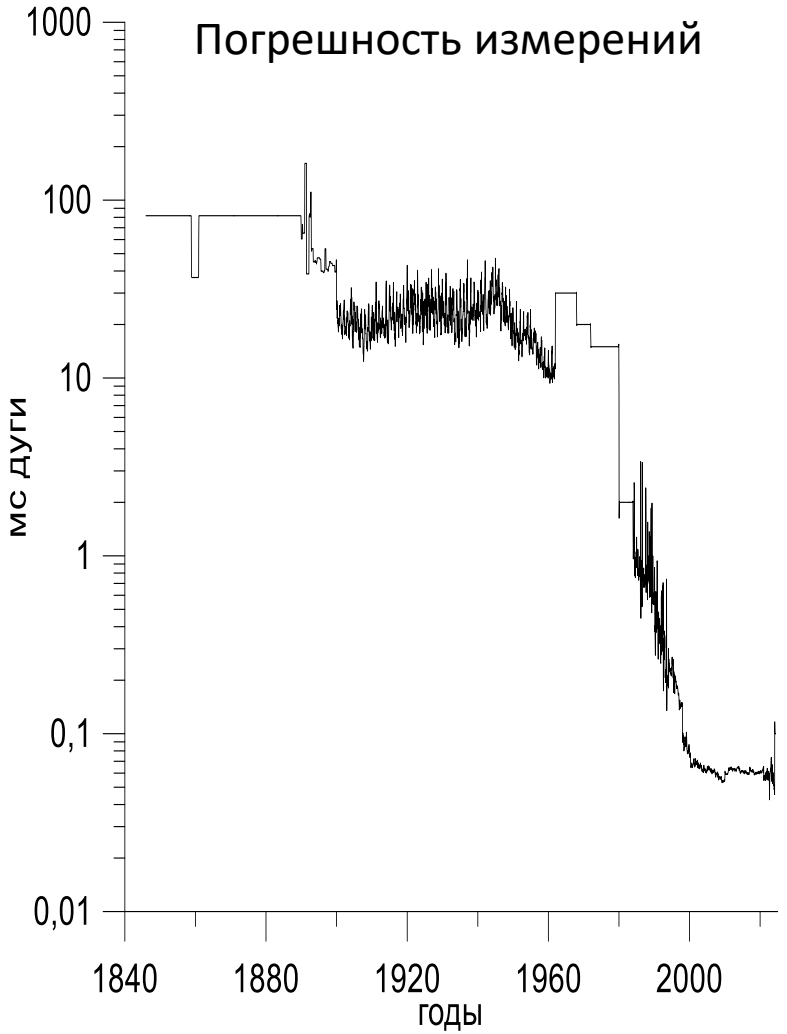
где $I_{11} \approx I_{22}$=8,01$\times 10^{37}$ кг ·м^2 - экваториальные моменты инерции, $k_2' = -0{,}3081$ – число Лява для коэффициентов второго порядка. Если воздействие на полюс Земли этих возбуждений импульсно, амплитуды смещений полюса (в радианах) приравнять $[x, y] = \sigma_c[\chi_2, \chi_1]$, где $\sigma_c = 2\pi f_c$ – циклическая Чандлерова частота, $f_c = 0.843$ цикла в год. Если воздействие ступенчато (переходная функция), амплитуду можно считать равной $[x, y] = [\chi_1, -\chi_2]$. Перевод радианов в см (без учета эллиптичности) делается так, чтобы в одном радиане на поверхности Земли укладывался один её радиус a_e.

Так, для Чебоксар 4/2026 получены $[\chi_1, \chi_2] = [1{,}05 \;\; 1{,}13] * 10^{-10}$ 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 $[\chi_1, \chi_2] = [1{,}42\; 1{,}63] * 10^{-8}$ радиан, что может сместить полюс на [x,y]= [38 36] см в импульсном режиме или на [9 10] см в ступенчатом. Реальная величина влияния, вероятно, лежит между этими оценками, которые можно считать верными до порядка. Можно также проинтегрировать вычисленные по бассейну Волги возбуждающие функции $[\chi_1, \chi_2]$ на всем интервале работы GFO посредством системы уравнений Эйлера-Лиувилля [3] для движений полюса и получить графики координат полюса, представленные на рис. 4. Начальные условия положены нами нулевыми.

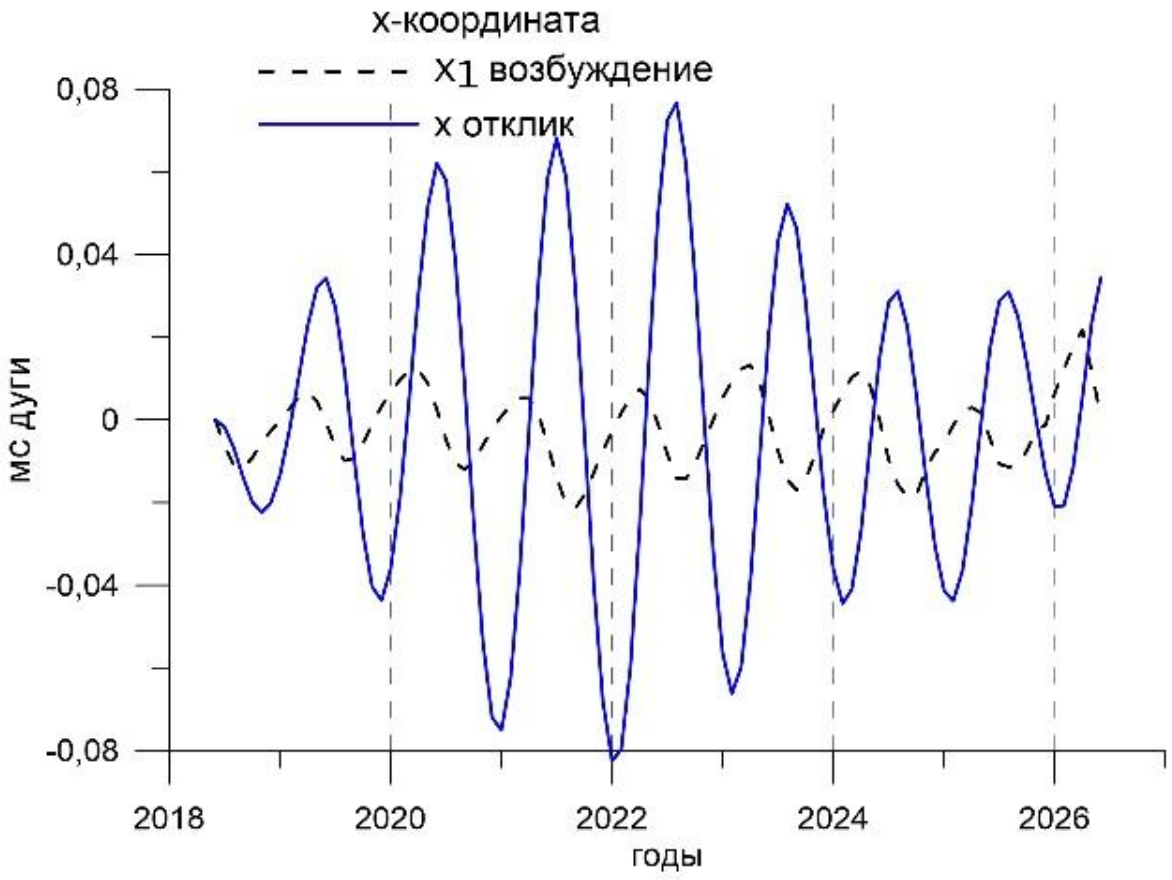
Номер бассейна STN0	Название реки	Площадь бассейна, м²	ЭУВ тренд по GRACE (см/год) 2004-2017	ЭУВ тренд по GRACE-FO (см/год) 2017-2026.6	Влияние изменений на 1 см ЭУВ по всему бассейну на LOD, мкс	Влияние изменений на 1 см ЭУВ по всему бассейну на $p_{1,2}$, см
16	Волга	1476411,4	-0,329±0,13	0,201±0,25	0,21	5,4 4,9
12	Амур	1754681,0	0,191±0,06	0,281±0,1	0,31	7,1 -5,4
47	Днепр	508839,2	-1,067±0,12	0,281±0,3	0,087	1,4 2,3
59	Двина	360944,0	0,139±0,14	-0.828±0,28	0,034	1,1 1,1
8	Лена	2441815,8	-0,296±0,07	0,324±0,15	0,256	9,2 -5,8
5	Обь	3025923,3	0,388±0,1	0,148±0,2	0,411	14,2 3,6
66	Печора	314291,8	0,333±0,13	-0,194±0,3	0,023	1,0 0,7
7	Енисей	2578730,3	0,046 ±0,08	0,63±0,17	0,32	11,9 -1,8
	По всем бассейнам	**12461636,8**	**-0.008±0.08**	**-0.31 ±0.15**	**1.65(1.86)**	**57,1 -3,8**

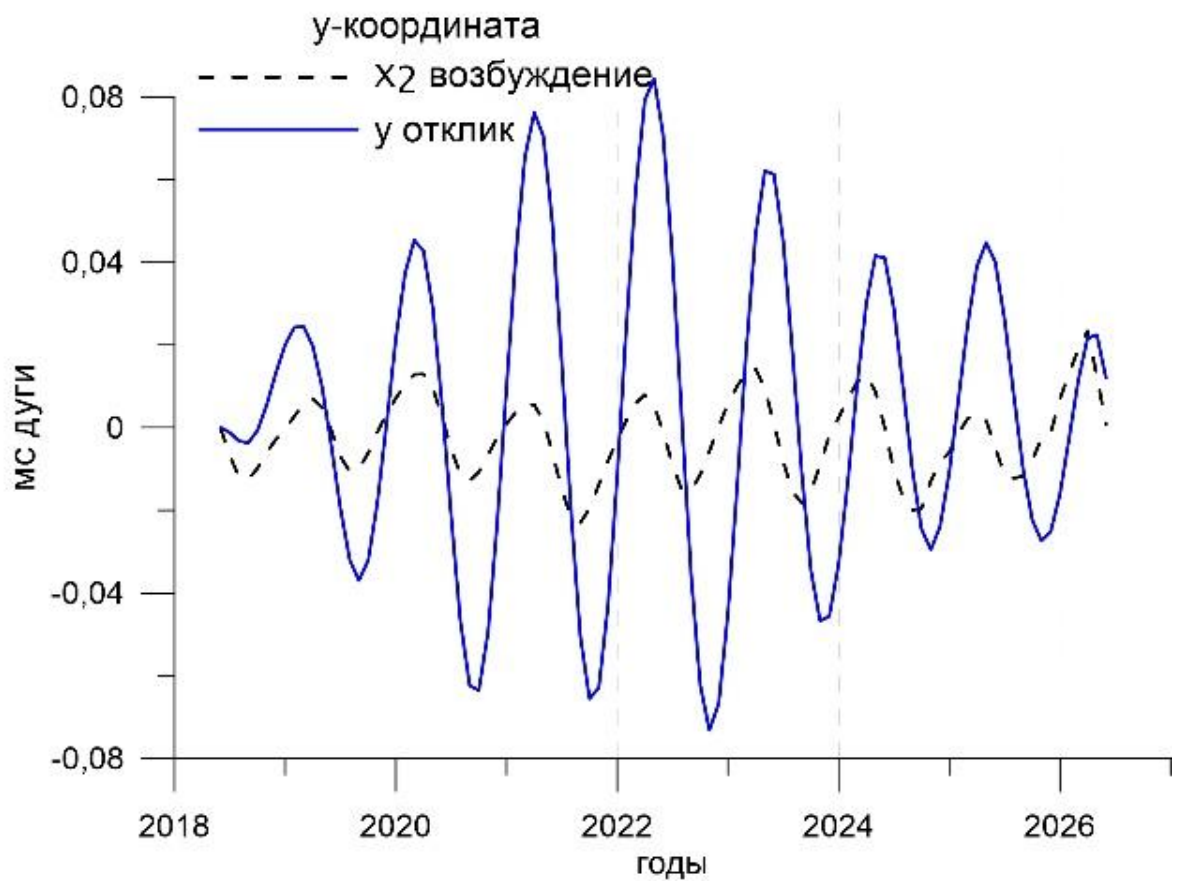
Движение полюса с 1846 по 2025 из бюллетеня EOP C01





Влияние перераспределений масс на координаты полюса





Вычисленные по бассейну Волги возбуждающие функции $[\chi_1, \chi_2]$ (пунктиром) и проинтегрированные отклики - координаты полюса (сплошным) в мс дуги

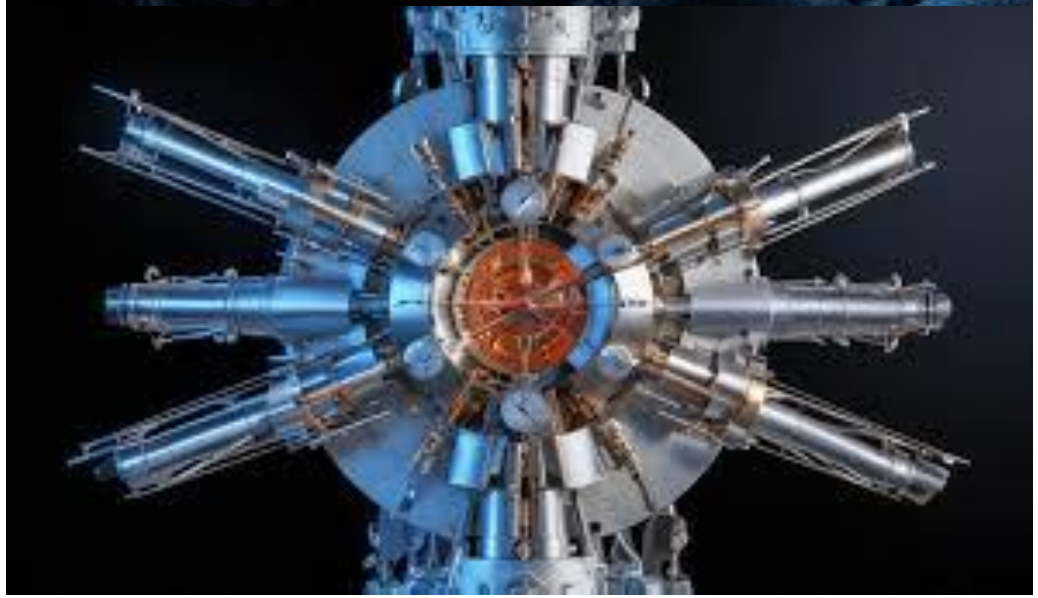
Синхронизация атомного времени под изменения скорости вращения Земли

Шкалу всемирного атомного времени UTC
Universal Time Coordinated
подстраивают так, чтобы различие UT1-UTC не превысило 0.9 сек.

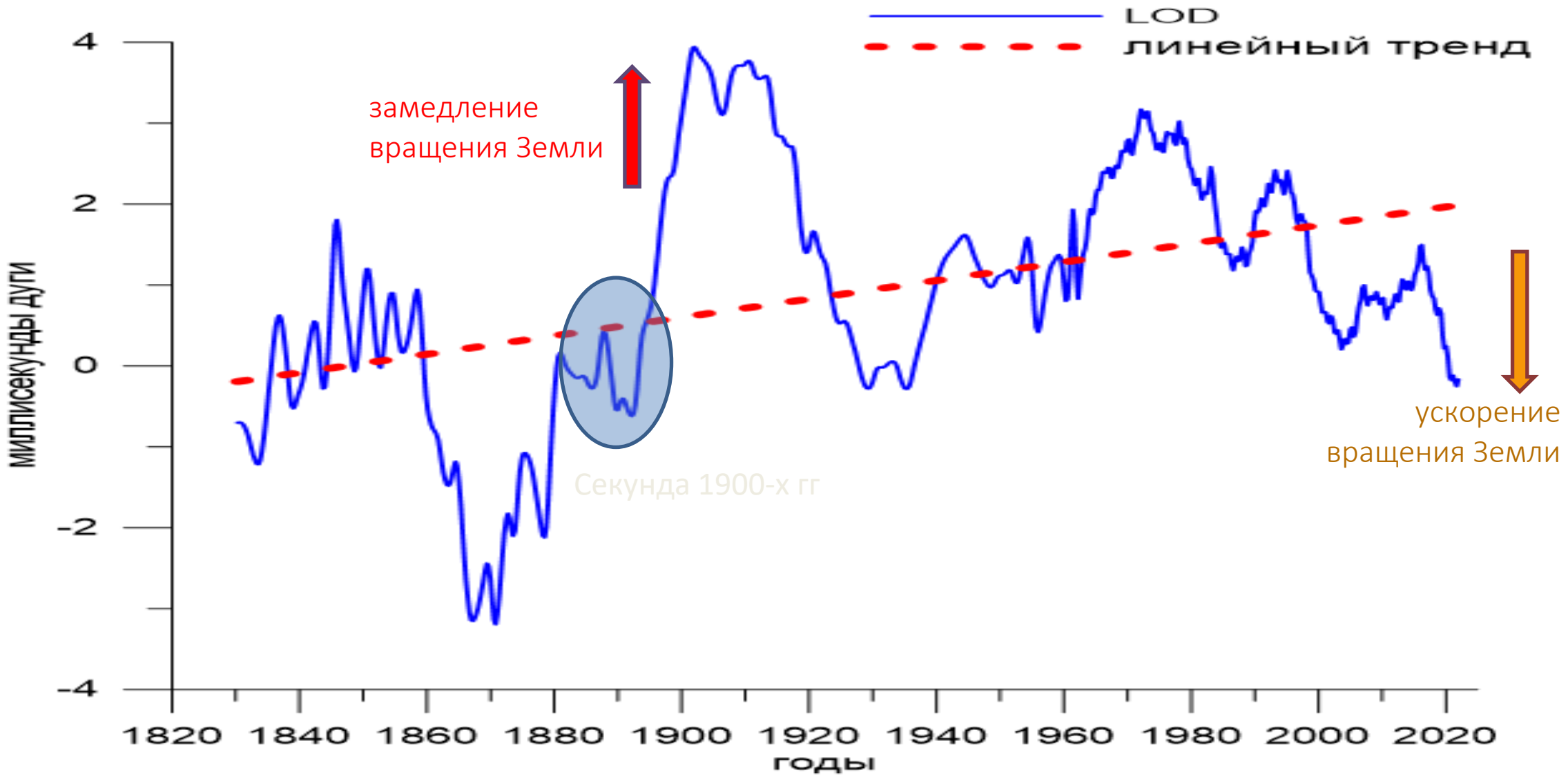
Для этого вводят дополнительную секунду.

На сегодня TAI отклоняется от шкалы времени UTC на 37 сек.





Долговременные изменения длительности суток
Length of Day ΔLOD по EOP C02



Расхождение TAI и UTC

EARTH ORIENTATION CENTER

BACK HOME SHOW THIS PAGE

RELATIONSHIP BETWEEN TAI AND UTC

Limits of validity (at 0h UTC) TAI-UTC (MJD = Modified Julian Day)

1961	Jan.	1 -	1961	Aug.	1	1.422 818 0s + (MJD - 37 300) x 0.001 296s
	Aug.	1 -	1962	Jan.	1	1.372 818 0s + ""
1962	Jan.	1 -	1963	Nov.	1	1.845 858 0s + (MJD - 37 665) x 0.001 123 2s
1963	Nov.	1 -	1964	Jan.	1	1.945 858 0s + ""
1964	Jan.	1 -		April	1	3.240 130 0s + (MJD - 38 761) x 0.001 296s
	April	1 -		Sept.	1	3.340 130 0s + ""
	Sept.	1 -	1965	Jan.	1	3.440 130 0s + ""
1965	Jan.	1 -		March	1	3.540 130 0s + ""
	March	1 -		Jul.	1	3.640 130 0s + ""
	Jul.	1 -		Sept.	1	3.740 130 0s + ""
	Sept.	1 -	1966	Jan.	1	3.840 130 0s + ""
1966	Jan.	1 -	1968	Feb.	1	4.313 170 0s + (MJD - 39 126) x 0.002 592s
1968	Feb.	1 -	1972	Jan.	1	4.213 170 0s + ""
1972	Jan.	1 -		Jul.	1	10s
	Jul.	1 -	1973	Jan.	1	11s
1973	Jan.	1 -	1974	Jan.	1	12s
1980	Jan.	1 -	1981	Jul.	1	19s
1981	Jul.	1 -	1982	Jul.	1	20s
1982	Jul.	1 -	1983	Jul.	1	21s
1983	Jul.	1 -	1985	Jul.	1	22s
1985	Jul.	1 -	1988	Jan.	1	23s
1988	Jan.	1 -	1990	Jan.	1	24s
1990	Jan.	1 -	1991	Jan.	1	25s
1991	Jan.	1 -	1992	Jul.	1	26s
1992	Jul.	1 -	1993	Jul	1	27s
1993	Jul.	1 -	1994	Jul.	1	28s
1994	Jul.	1 -	1996	Jan.	1	29s
1996	Jan.	1 -	1997	Jul.	1	30s
1997	Jul.	1 -	1999	Jan.	1	31s
1999	Jan.	1 -	2006	Jan.	1	32s
2006	Jan.	1 -	2009	Jan.	1	33s
2009	Jan.	1 -	2012	Jul.	1	34s
2012	Jul.	1 -	2015	Jul.	1	35s
2015	Jul.	1 -	2017	Jan.	1	36s
2017	Jan.	1 -				37s

Выводы

Мы проанализировали данные с гравиметрических спутников GRACE (2002-2017) и GRACE-FO (2018-н.в.) в бассейнах рек России и оценили тренды ЭУВ.

К примеру, для бассейна Волги они составили -0,32 см/год по данным GRACE RL 7 (с 2004 г) и +0.20 см/год по данным GRACE-FO RL 6.3.

Аномалия массонакопления в апреле 2026 г. оказалась рекордной в бассейнах Волги, Оби и Енисея. В частности, для Москвы это получило подтверждение измерениями абсолютным гравиметром ГАБЛ-М на Красной Пресне

Сделаны оценки потенциального вклада в координаты полюса и длительность суток (LOD) изменений ЭУВ в бассейнах крупных рек на 1 см. В целом такое изменение по России способно изменить LOD на 1-2 мкс и сместить полюс на 60 см по X (Гринвич) и 4 см по У (90^{o} ВД) .

Спасибо за внимание!