Космическая гравиметрия GRACE и GFO для гидрологии и вращения Земли

Зотов Леонид Валентинович[1]

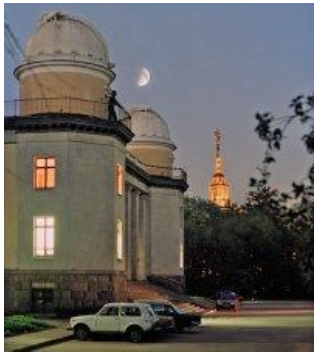
Юшкин Виктор Дмитриевич[2]

Фролова Наталья Леонидовна[3]

Шам С.К. [4]

[1]НИУ ВШЭ [2]ГАИШ МГУ [3]Географический ф-т МГУ

[4]Школа Наук о Земле шт. Огайо

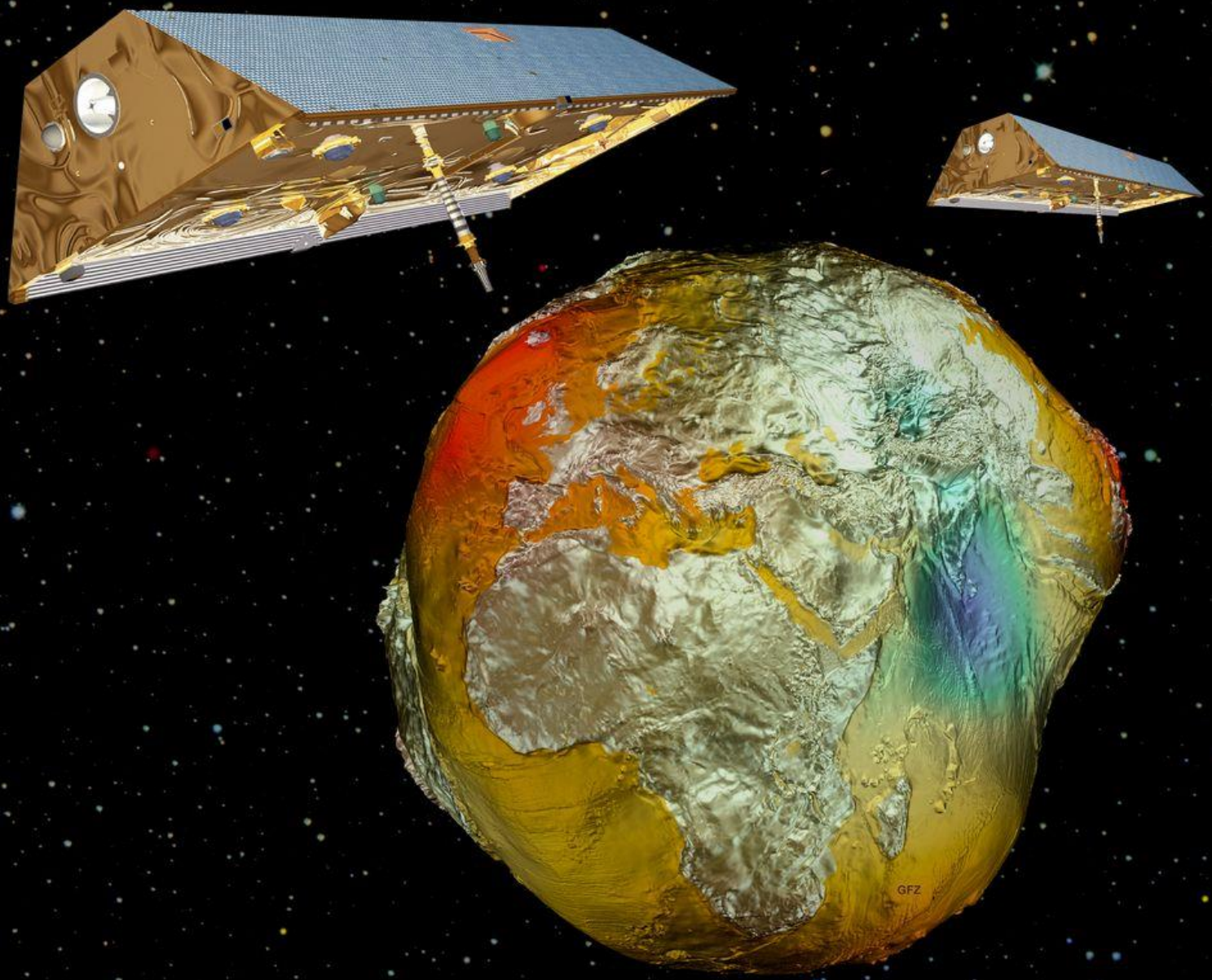


The X International Conference on Information Technology and Nanotechnology

Самара

24 мая 2024 г.

Спутники GRACE



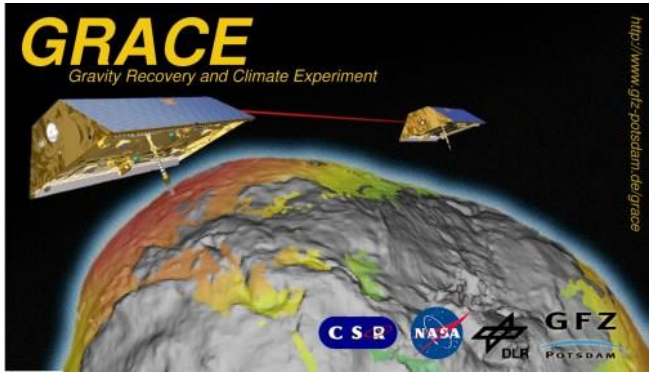
Миссии по исследованию гравитационного поля

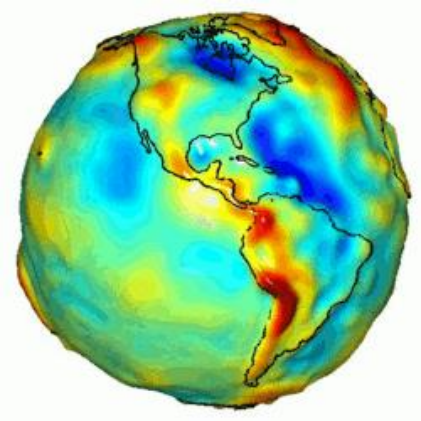
CHAMP - запущен GFZ в июле 2000 г. на орбиту высотой около 450 км. С целью изучения гравитационного и магнитного полей. Данные поступали 8 лет.

GRACE - эксперимент по исследованию гравитационного поля и климата, два спутника – близнеца, разработанные NASA/DLR, запущены с космодрома Плесецк 17 марта 2002 г. Миссия закончила работу в 2017 г.

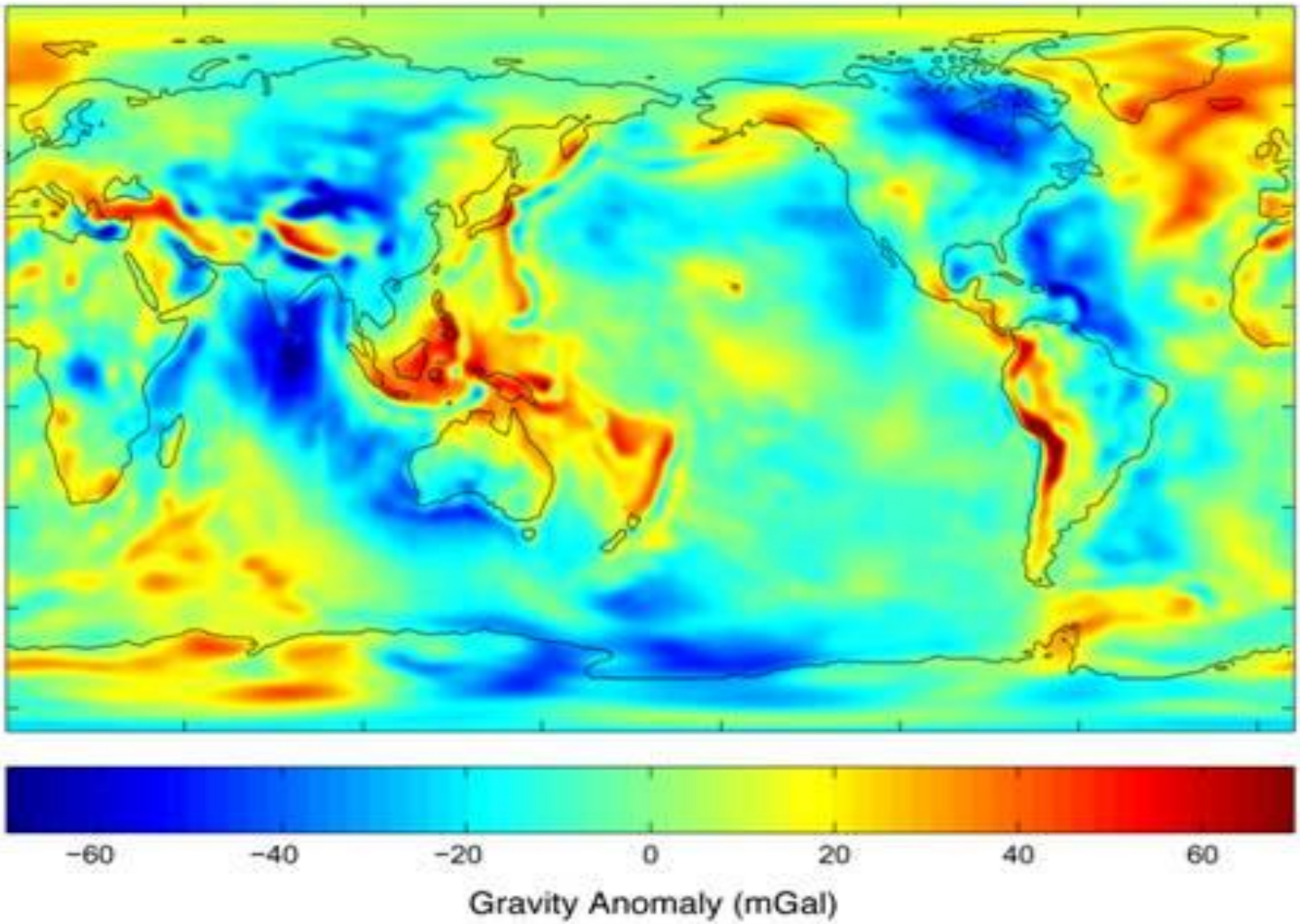
GRACE-FO – пришли на смену 22.05.2018 г. Спутники следуют один за другим на расстоянии ~220 км по околополярной орбите на высоте ~500 км, покрывая Землю за ~30 суток. Основными измеряемыми величинами являются расстояние между спутниками и его изменения под влиянием ускорений, обусловленных пролетами над притягивающими массами.

GOCE - запущен в марте 2009 г. на орбиту высотой 260 км. С помощью высокоточного градиентометра получена модель Грав. поля. погрешность высот геоида 1 см при разрешении 100 км, менее 1 мм для больших пространственных частот. Отработав, спутник упал 11.11.2013 г. в океан.





Гравитационное поле Земли GGM03s



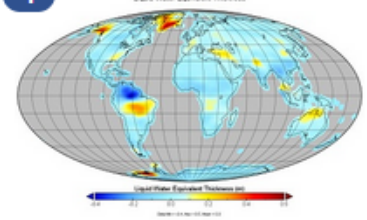
$$V(\varphi,\lambda,r)=\frac{GM}{r}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{a}{r}\right)^{n}\left(C_{nm}\cos m\lambda+S_{nm}\sin m\lambda\right)P_{n}^{m}(\sin\varphi)$$

Данные в архиве

podaac
Physical Oceanography Distributed Active Archive Center

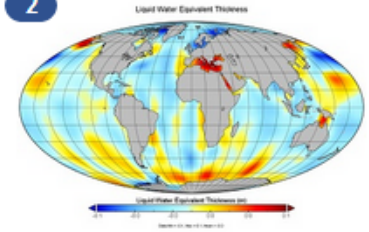
Prev 1 Next

1



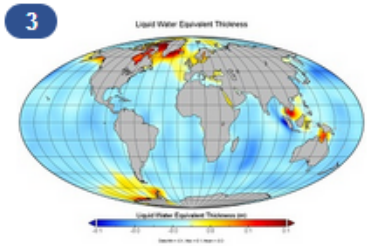
JPL TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly Release 6.0 in netCDF/ASCII/GeoTIFF Formats
(TELLUS_GRFO_L3_JPL_RL06_LND)
Ocean Pressure, GRAVITY/GRAVITATIONAL FIELD
Platform/Sensor: GRACE-FO/GRACE-FO ACC , GRACE-FO/GRACE-FO KBR , GRACE-FO/GRACE-FO SCA
Processing 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

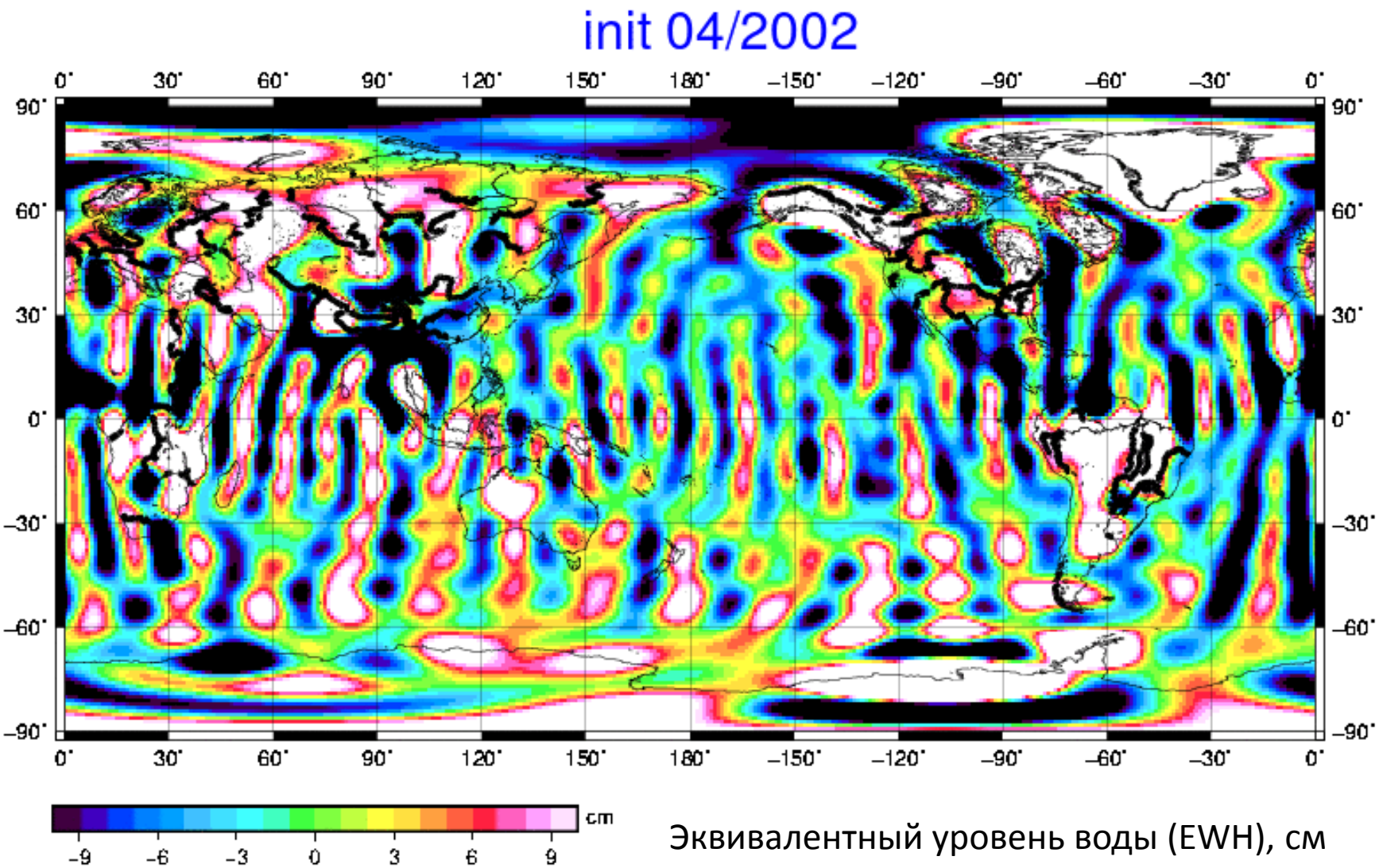
БАЗИСОМ ВЫСТУПАЕТ НАБОР СФЕРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

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

ОБЬЕМ ИНФОРМАЦИИ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ КОЛИЧЕСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

```
    solution_comment:
      long_name              : Comment when present
      coverage_content_type  : referenceInformation
      data_type              : string
      comment                : 11th column
# End of YAML header
GRCOF2    2    0 -4.84169722894e-04  0.00000000000e+00
GRCOF2    2    1 -5.31728650171e-10  1.57604711901e-09
GRCOF2    2    2  2.43953202405e-06 -1.40022588858e-06
GRCOF2    3    0  9.57089479963e-07  0.00000000000e+00
GRCOF2    3    1  2.03042487689e-06  2.48264378269e-07
GRCOF2    3    2  9.04724725557e-07 -6.19132857473e-07
```

Исходные данные GRACE JPL RL06 Уровня 2



Эквивалентный уровень воды (EWH), см

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

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-ССА – “Гусеница”

$$X = USV^T$$

3) Для каждого сингулярного числа s_i восстанавливается матрица

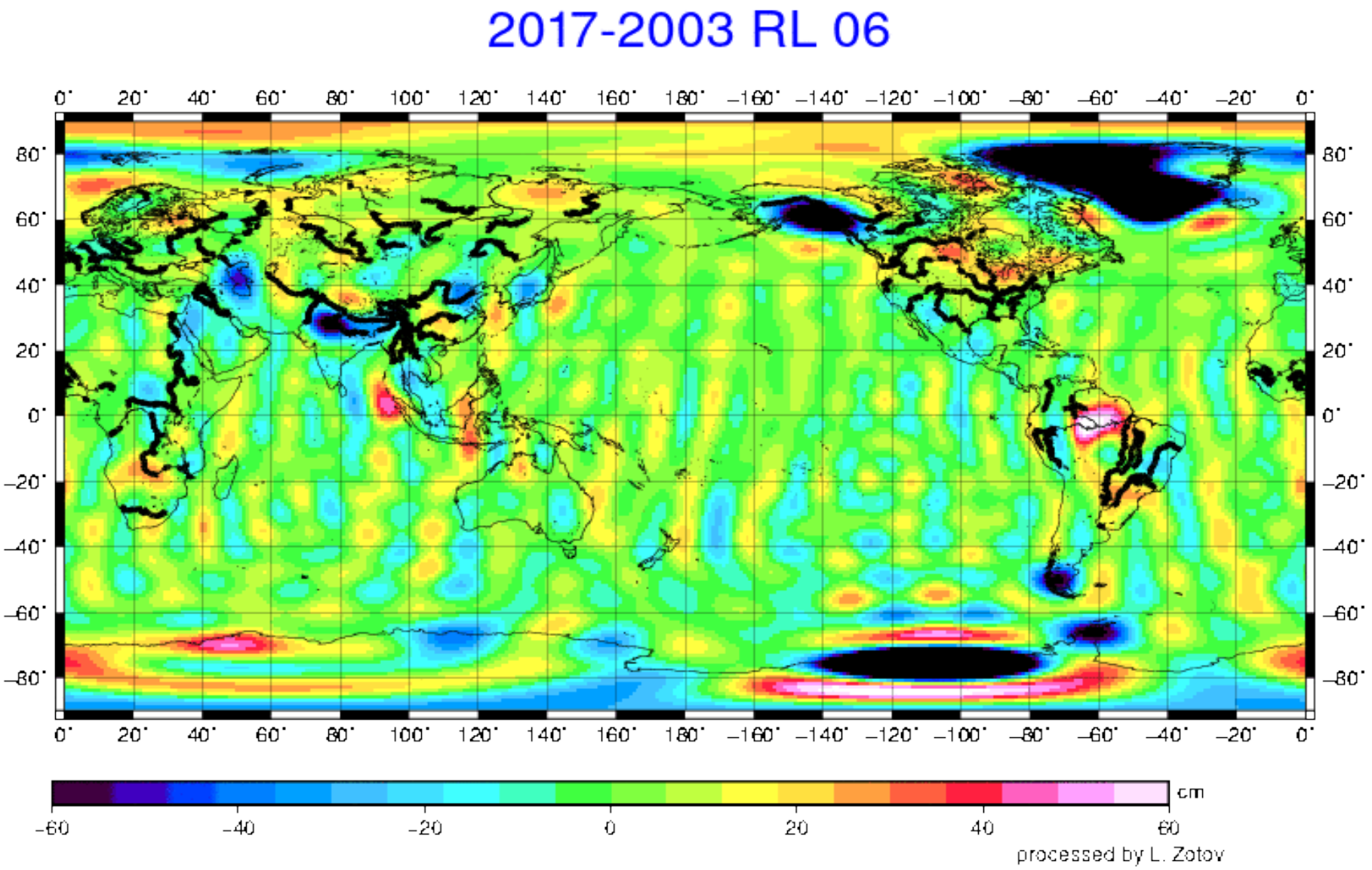
$$X^i = s_i u_i v_i^T,$$

И усреднением вдоль побочных диагоналей (Генкелизацией) восстанавливается компонента сигнала

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

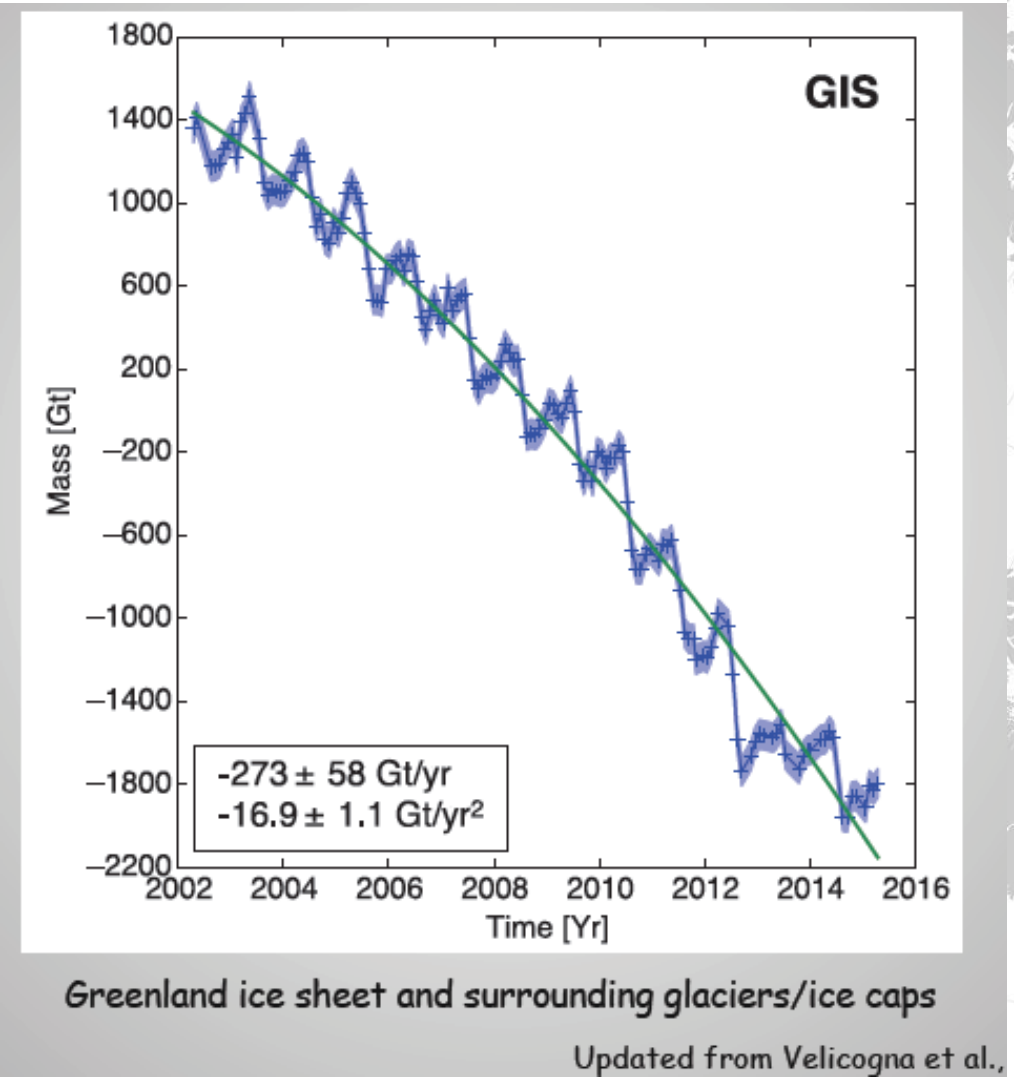
PC1, PC2, PC3…

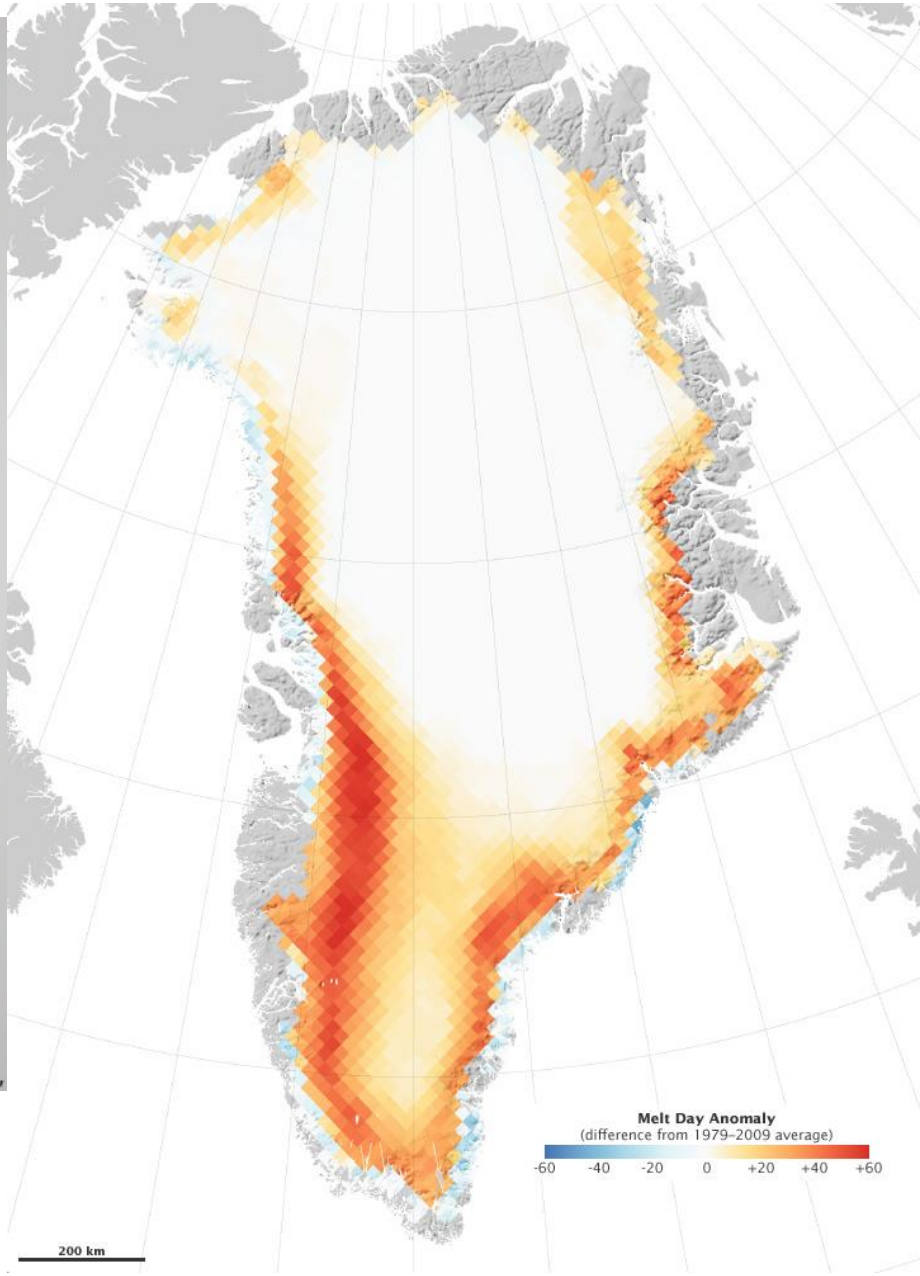
Климатические тренды в данных миссии GRACE



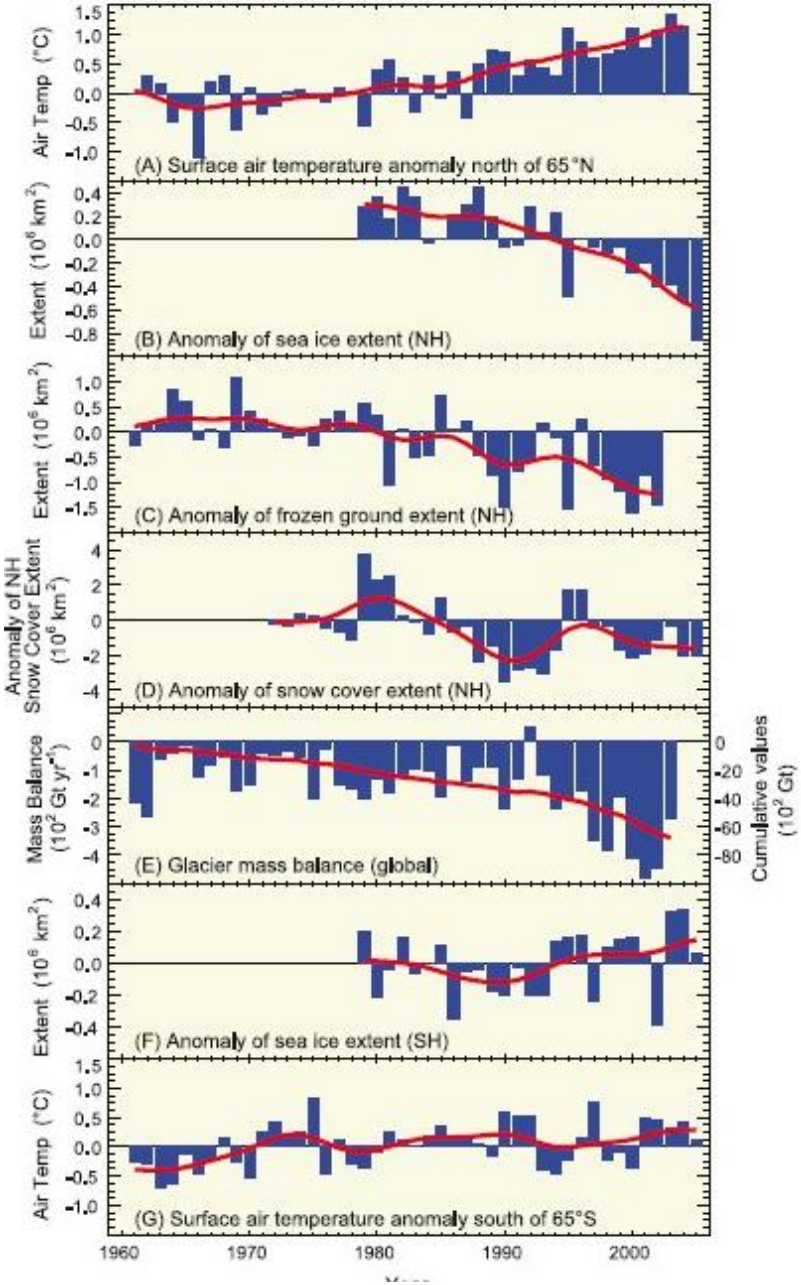
Изменения масс вследствие климатических и других факторов

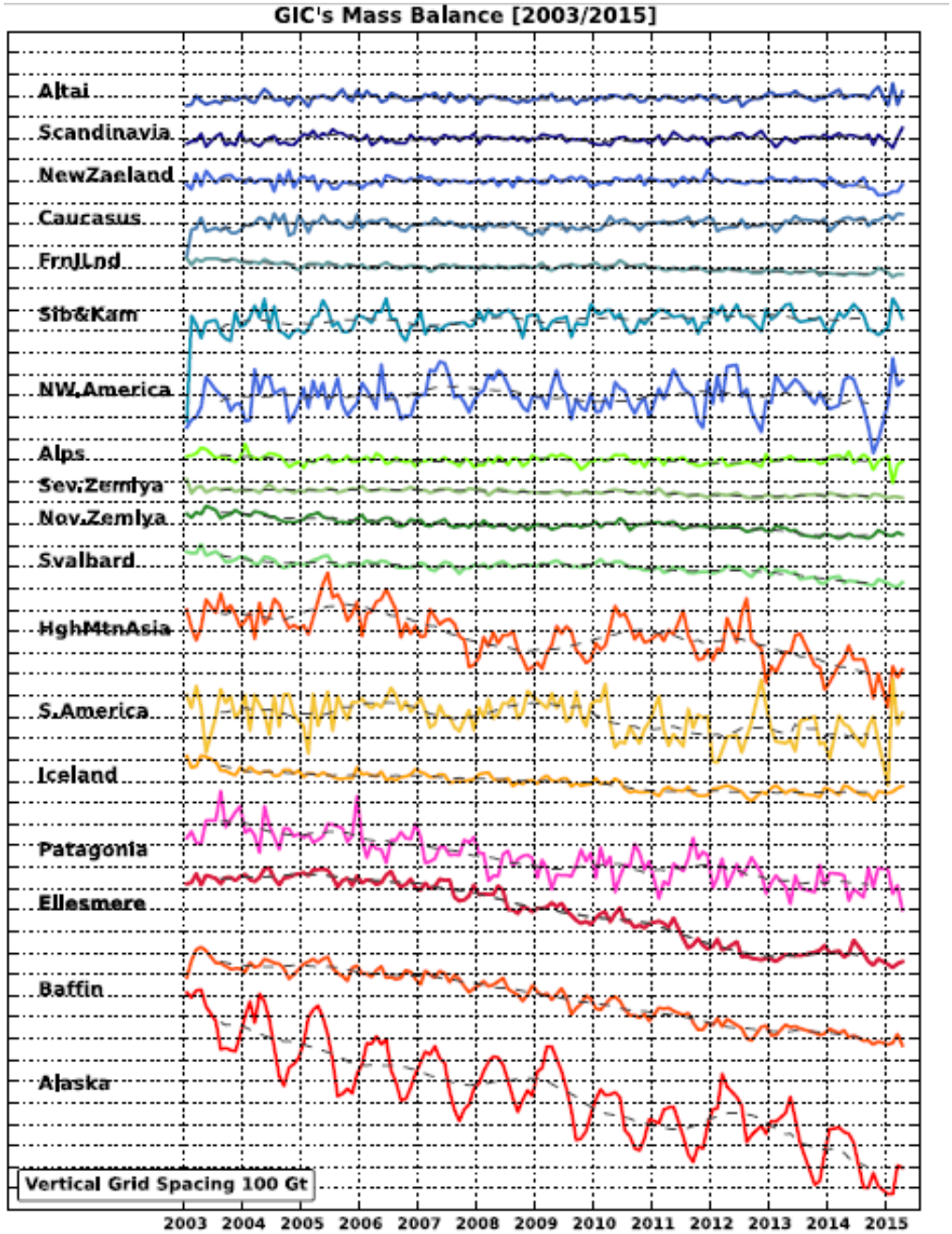
Гренландия 1979-2017



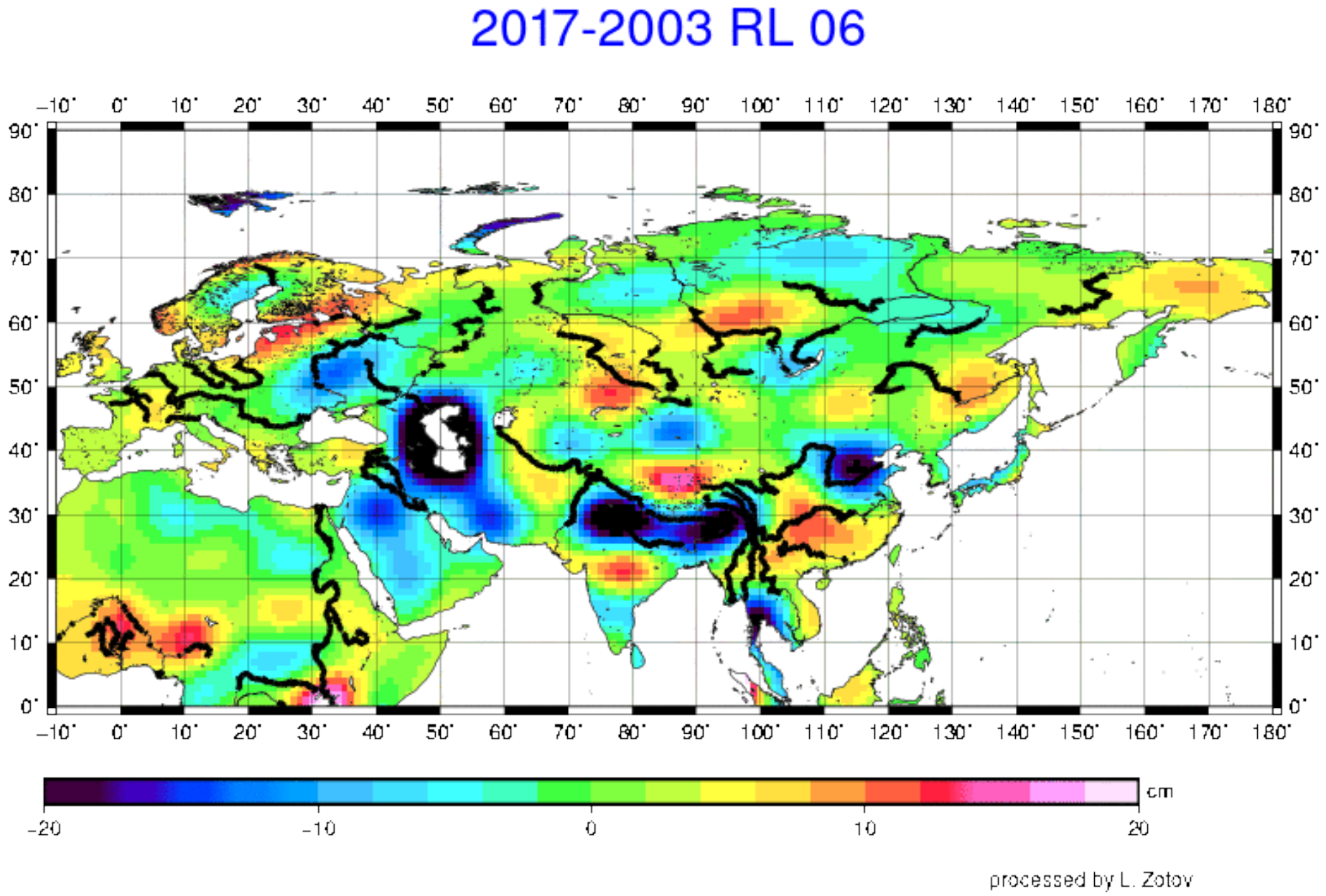


Ледники


Air Temp (°C)
(A) Surface air temperature anomaly north of 65°N
Extent (10^6 km^2)
(B) Anomaly of sea ice extent (NH)
Extent (10^6 km^2)
(C) Anomaly of frozen ground extent (NH)
Anomaly of NH Snow Cover Extent (10^6 km^2)
(D) Anomaly of snow cover extent (NH)
Mass Balance (10^2 Gt yr^{-1})
(E) Glacier mass balance (global)
Cumulative values (10^2 Gt)
Extent (10^6 km^2)
(F) Anomaly of sea ice extent (SH)
Air Temp (°C)
(G) Surface air temperature anomaly south of 65°S
1960
1970
1980
1990
2000

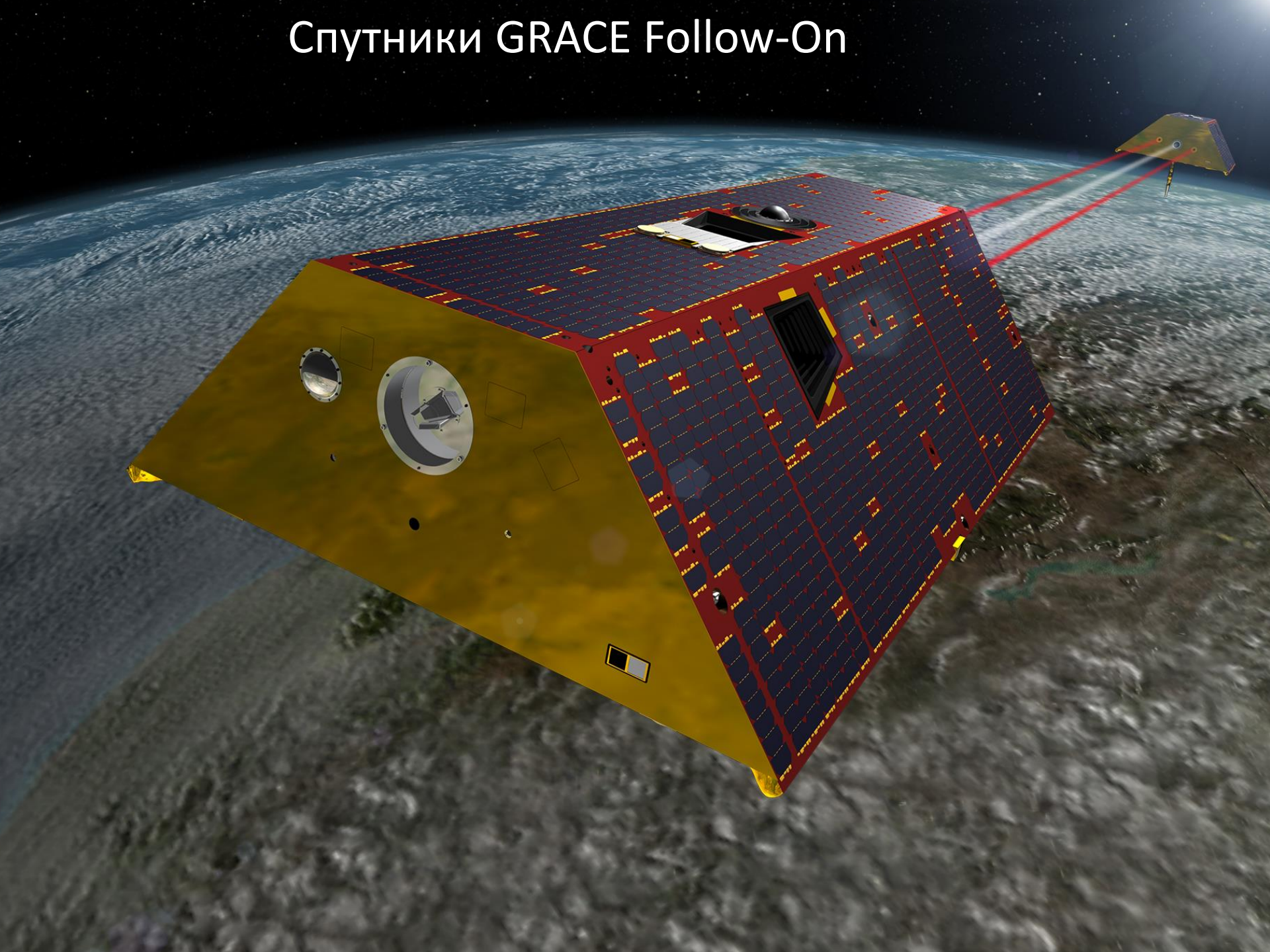

GIC's Mass Balance [2003/2015]
Altai
Scandinavia
NewZealand
Caucasus
FranJ.Lnd
Sib&Kam
NW.America
Alps
Sev.Zemlya
Nov.Zemlya
Svalbard
HghMtnAsia
S.America
Iceland
Patagonia
Ellesmere
Baffin
Alaska
Vertical Grid Spacing 100 Gt
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015

Тренды в изменении масс с 2003 по 2017 г. над Евразией по данным GRACE

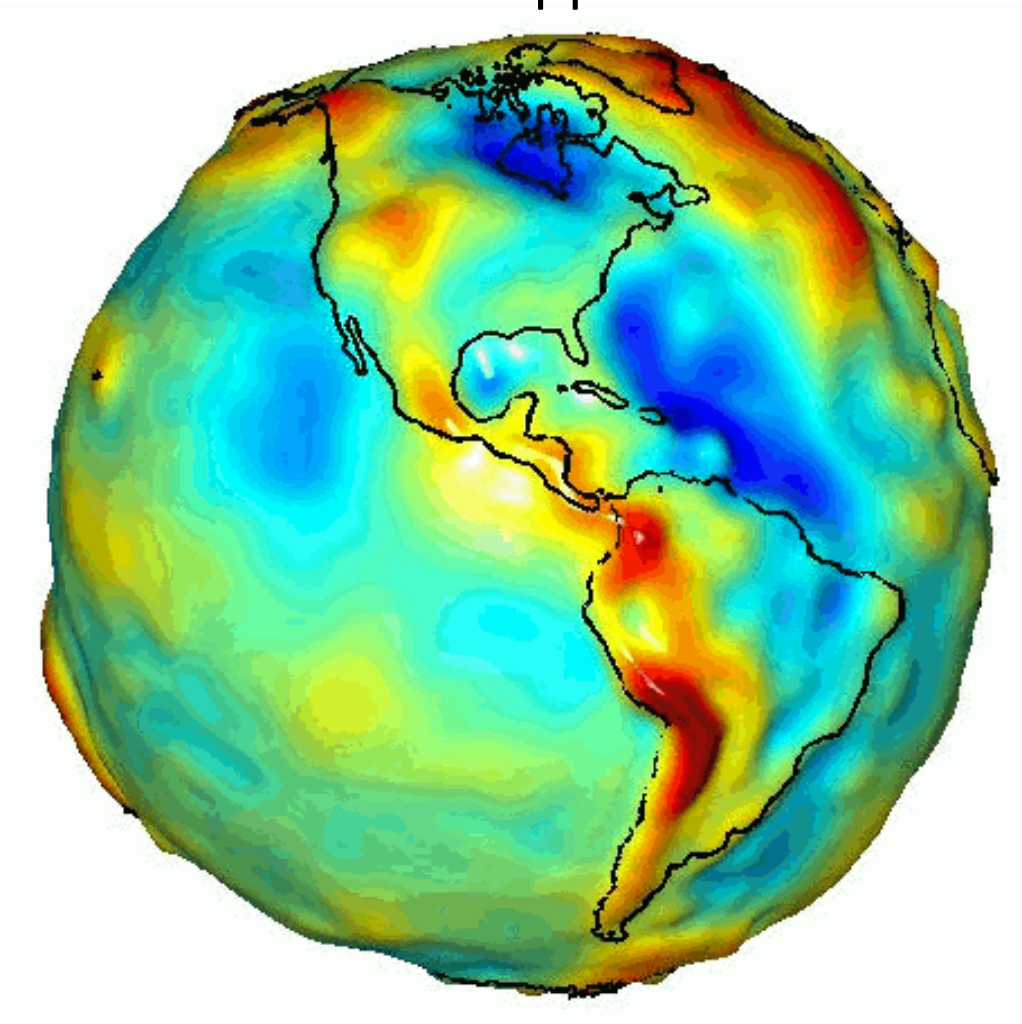


The NASA/German Research Centre for Geosciences GRACE Follow-On spacecraft launch onboard a SpaceX Falcon 9 rocket, Tuesday, May 22, 2018, from Space Launch Complex 4E at Vandenberg Air Force Base in California. The mission will measure changes in how mass is redistributed within and among Earth's atmosphere, oceans, land and ice sheets, as well as within Earth itself. GRACE-FO is sharing its ride to orbit with five Iridium NEXT communications satellites as part of a commercial rideshare agreement. Credit: NASA/Bill Ingalls

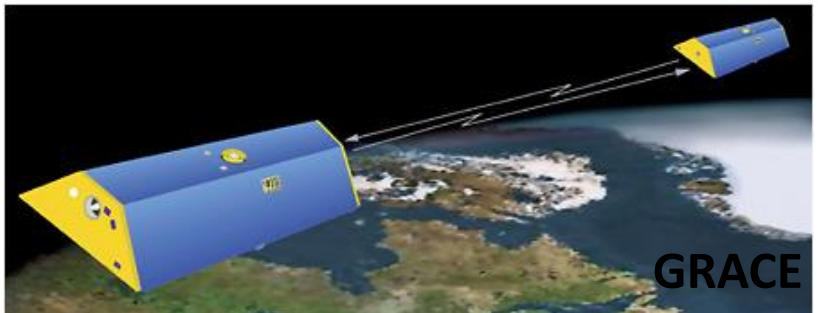
Спутники GRACE Follow-On



Геоид



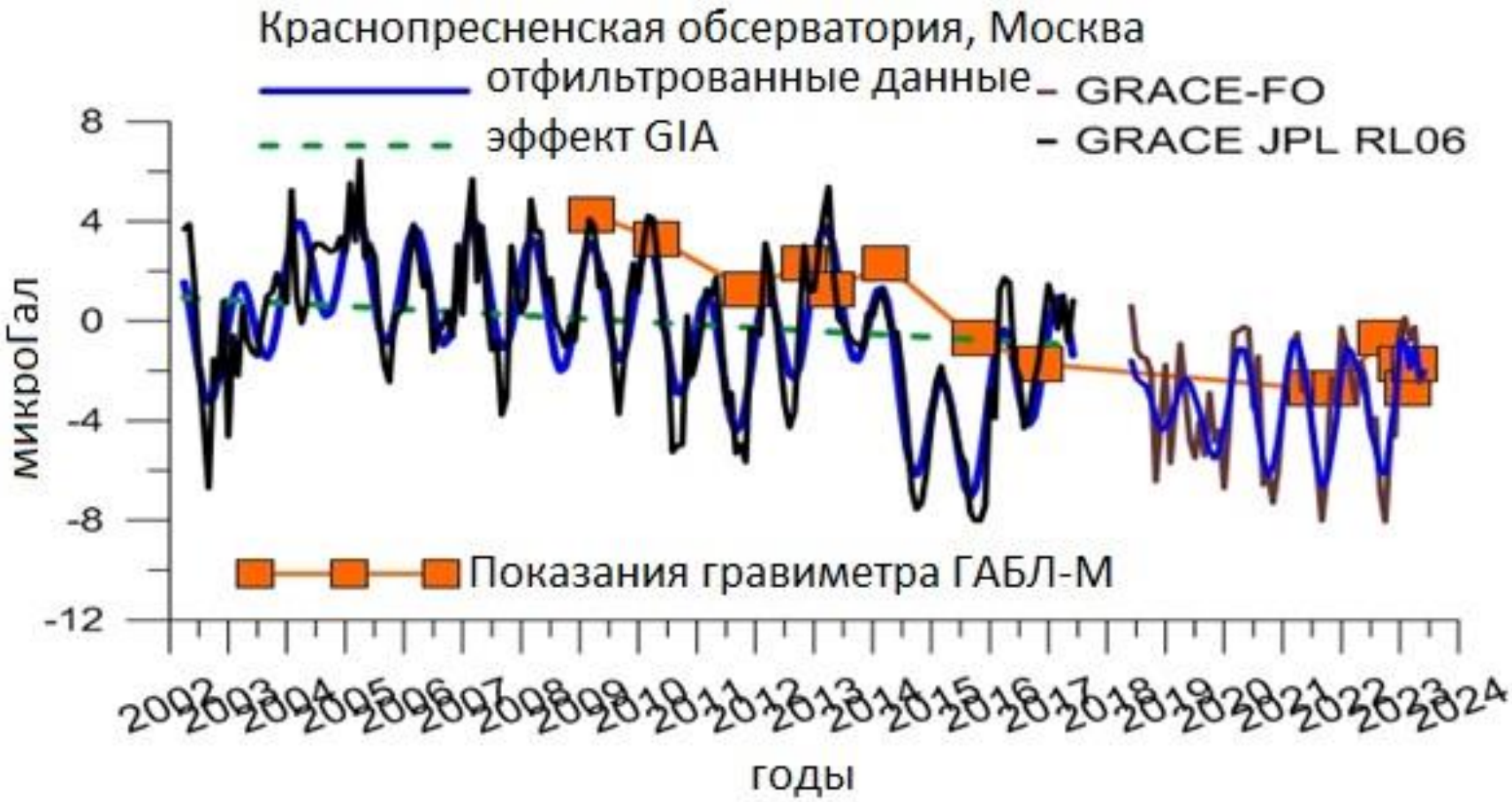
Гравиметр
ГАБЛ



$g \approx 9{,}8066$ м/с^2 ≈ 980 Гал

Сравнение данных GRACE с данными абсолютной гравиметрии

Главный гравиметрический пункт СССР



Данные Виктора Юшкина

Зотов Л.В. и др., 2024

processed by L. Zotov

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.*

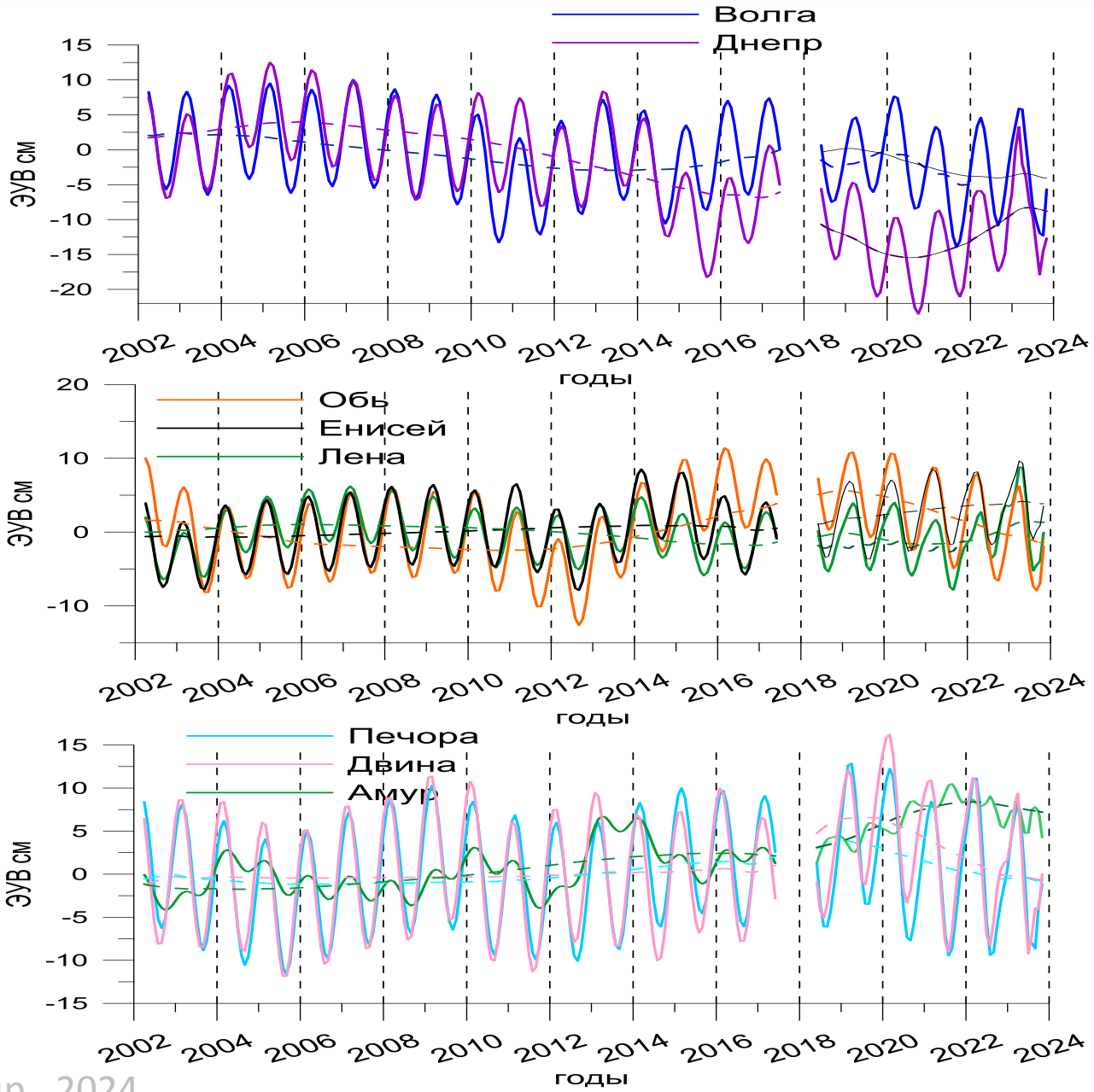
С.К.Шам (C.K.Shum), *профессор отделения геодезии Школы наук о Земле Университета штата Огайо (г.Колумбус, США). Один из авторов отчета IPCC по климату 2007 г. Специалист в области климатических изменений, спутниковой геодезии, геодинамики, исследований системы моря, данных GRACE.*

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

Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России

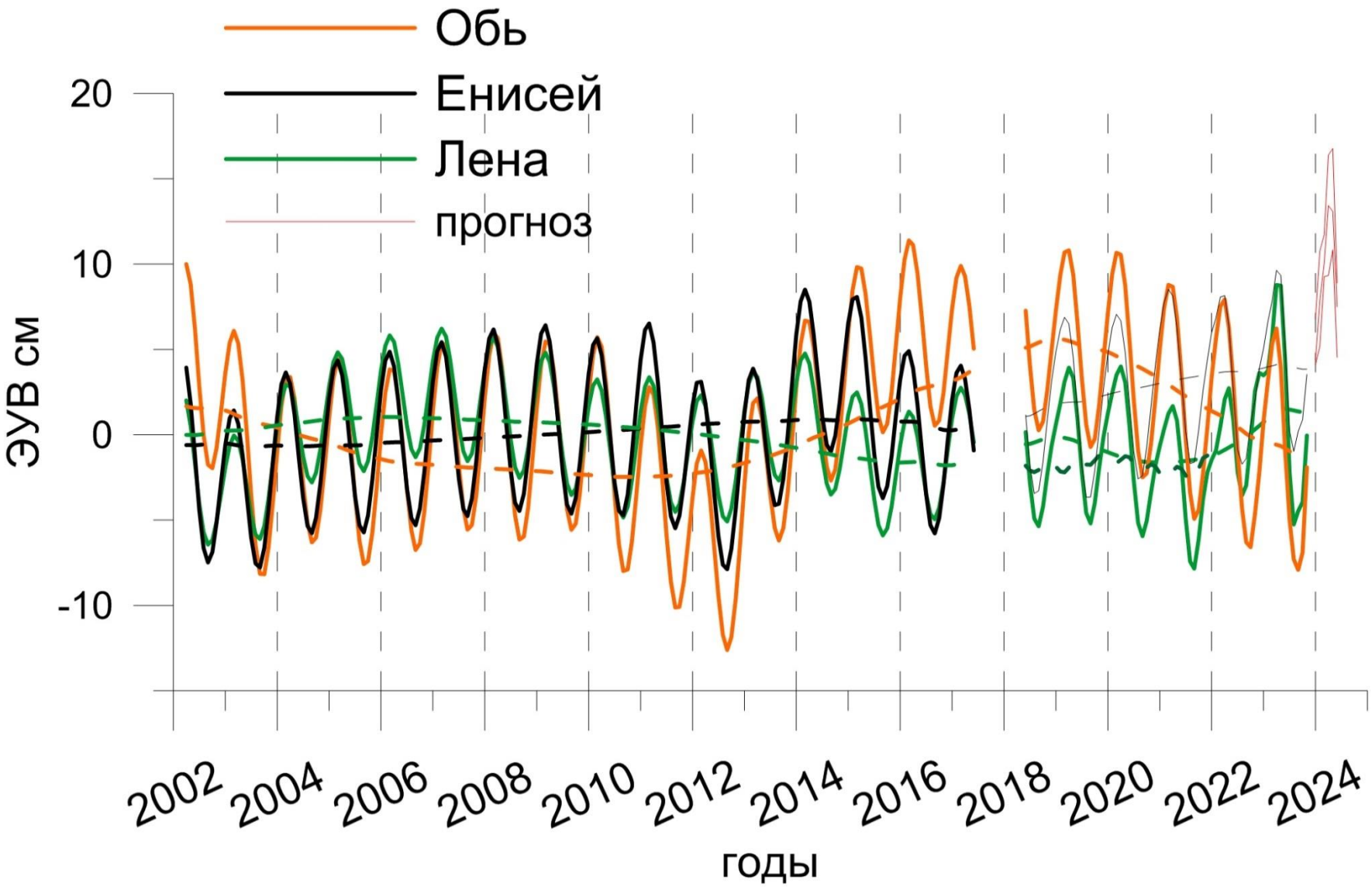
Спутниковая система GRACE, действующая на орбите Земли с 2002 г., позволяет изучать гравитационные аномалии и их временные вариации, обусловленные процессами массопереноса в оболочках Земли. На основе анализа гравитационных отклонений, зарегистрированных с помощью спутников GRACE, удалось оценить изменчивость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

Аномалии масс в бассейнах крупных рек России



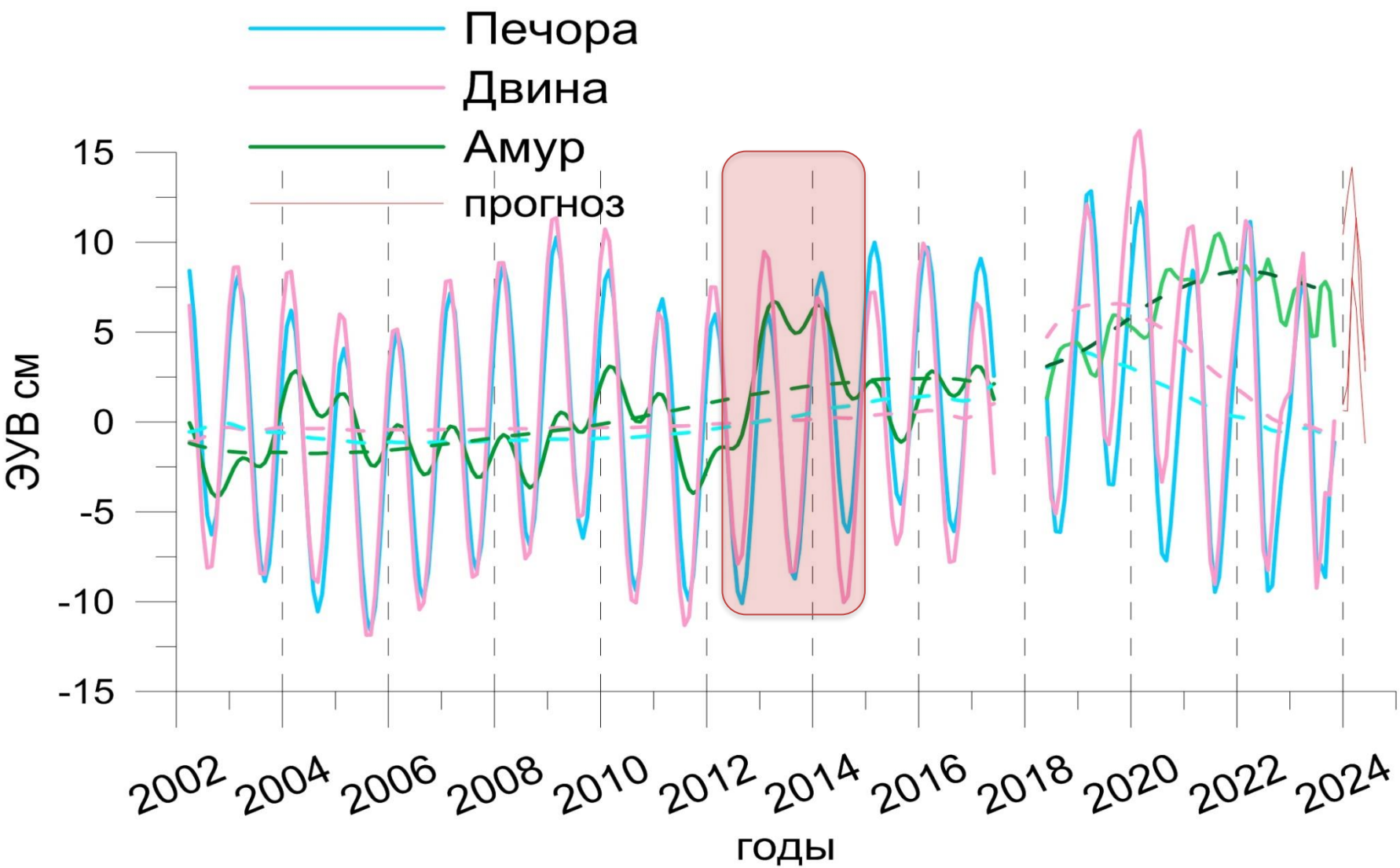
Зотов Л.В. и др., 2024

Изменения в бассейнах рек Сибири



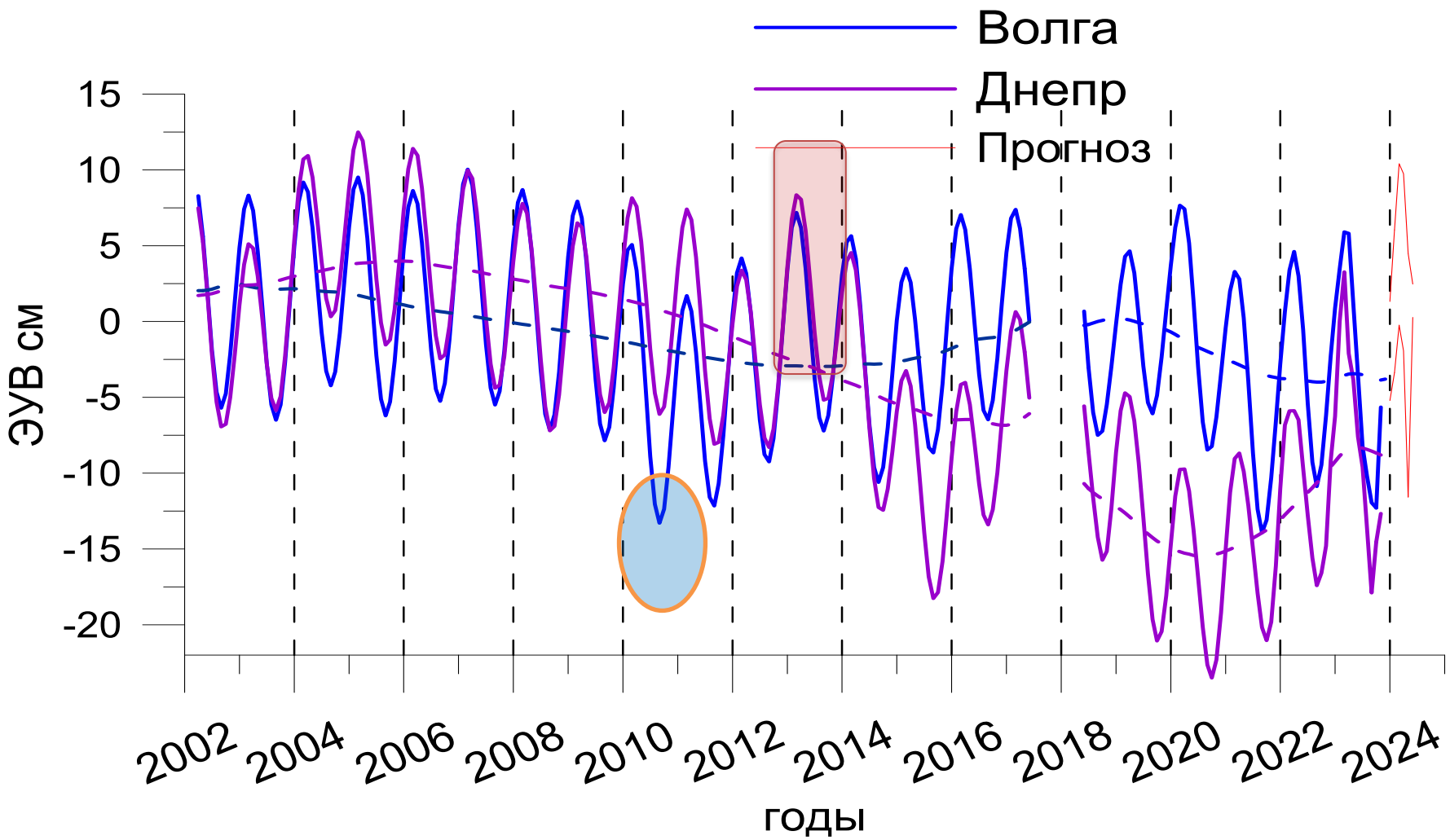
Зотов Л.В. и др., 2024

Изменения масс на Амуре и реках севера



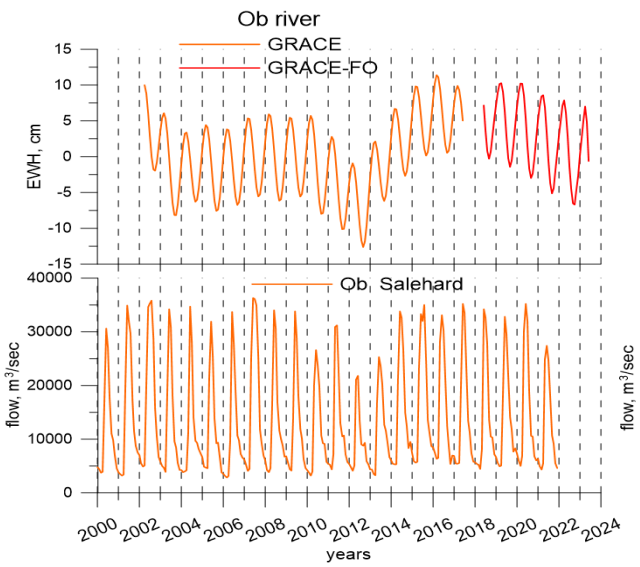
Зотов Л.В. и др., 2024

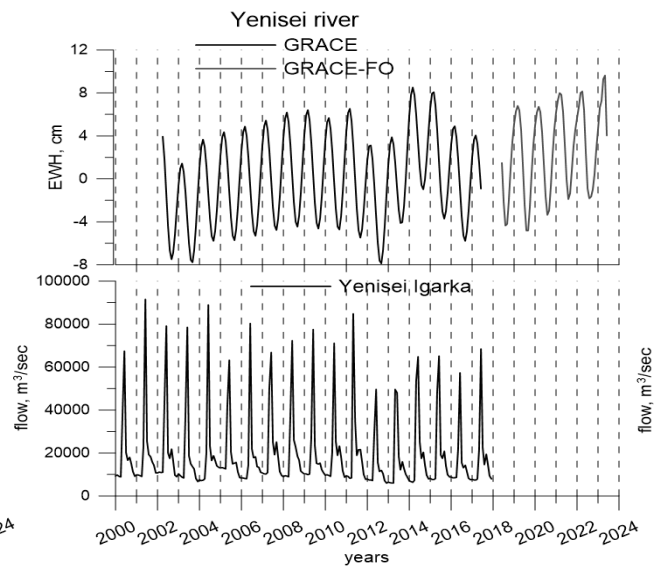
Изменения в бассейнах рек Европейской части

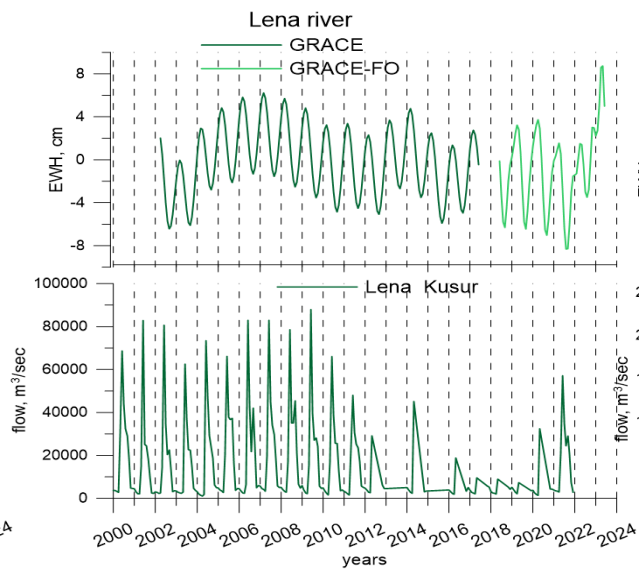


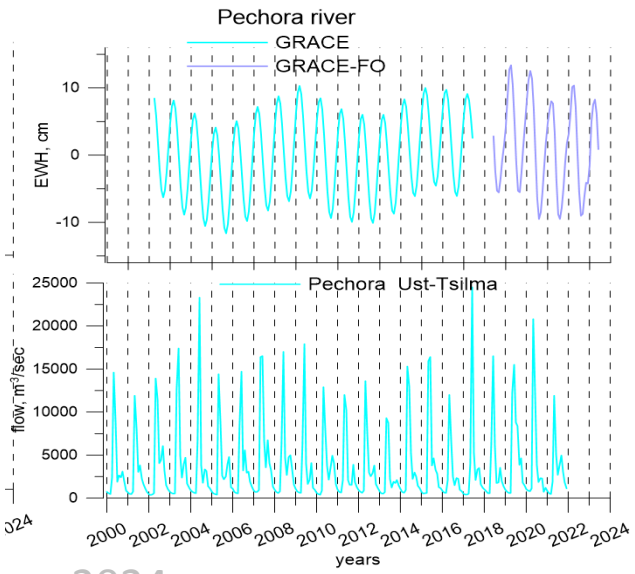
Зотов Л.В. и др., 2024

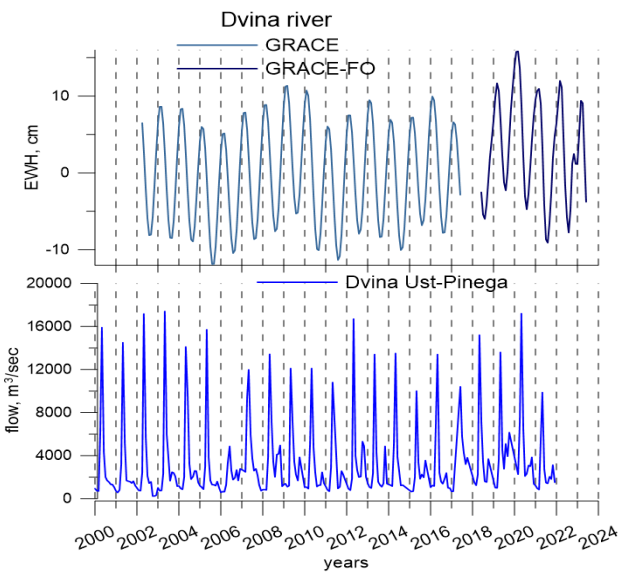
Сравнения данных GRACE и GFO с показаниями гидрологических постов











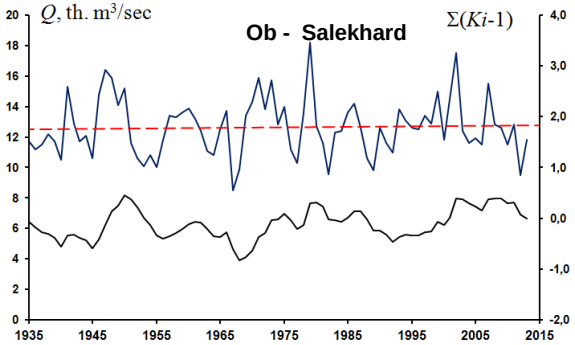
Зотов Л.В. и др., 2024

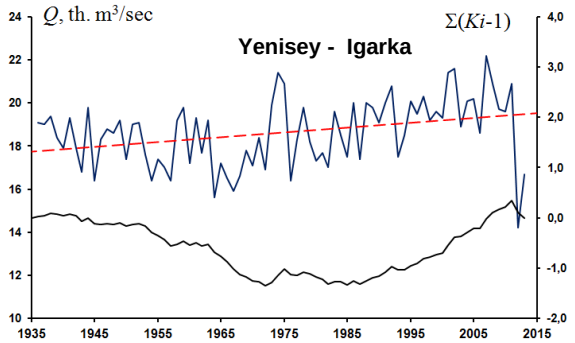
Долговременные изменения годового стока рек

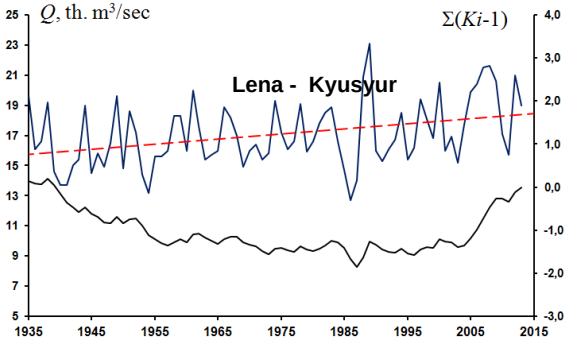
River – hydrometric station	$\Delta W_Q/\Delta y$*	The linear trend coefficient, km³/1year	
		1935-2013	1975-2013
Sev.Dvina - Ust-Pinega	+5.3%/+15mm	+0.098	+0.091
Mezen - Malonisogorskaya	-1.7%/-6mm	+0.005	+0.029
Pechora - Ust-Tsilma	+4.6%/+20mm	+0.173	+0.184
Ob - Salekhard	-0.4%/-0.7mm	+0.089	-0.089
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

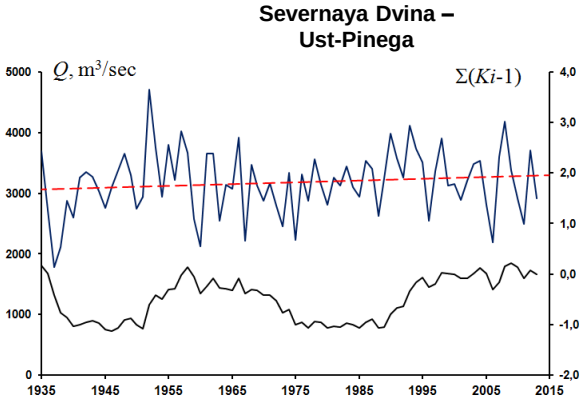
Изменения годового стока за 1976-2013 в сравнении со стоком за 1935-1975

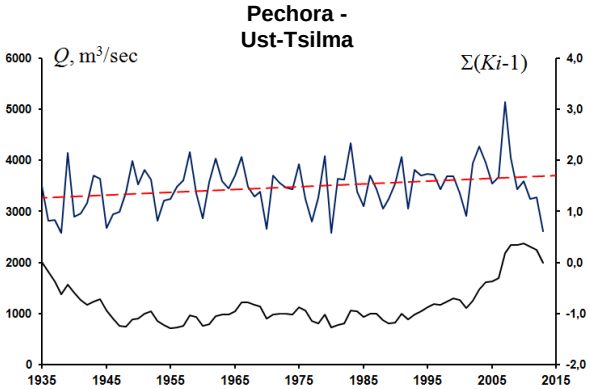
Данные Н.Л. Фроловой

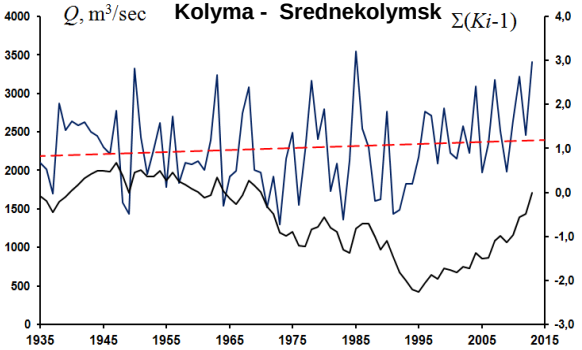


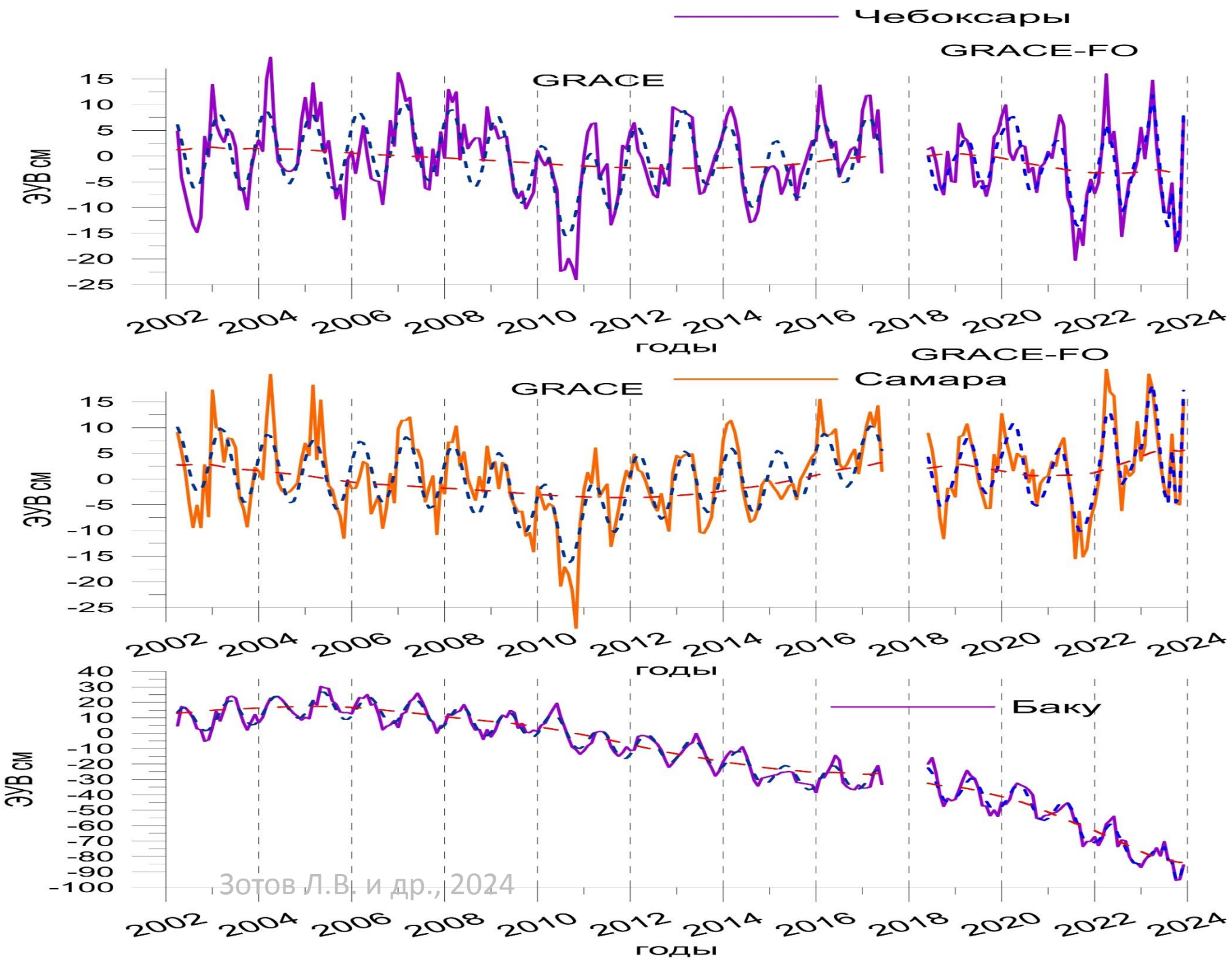






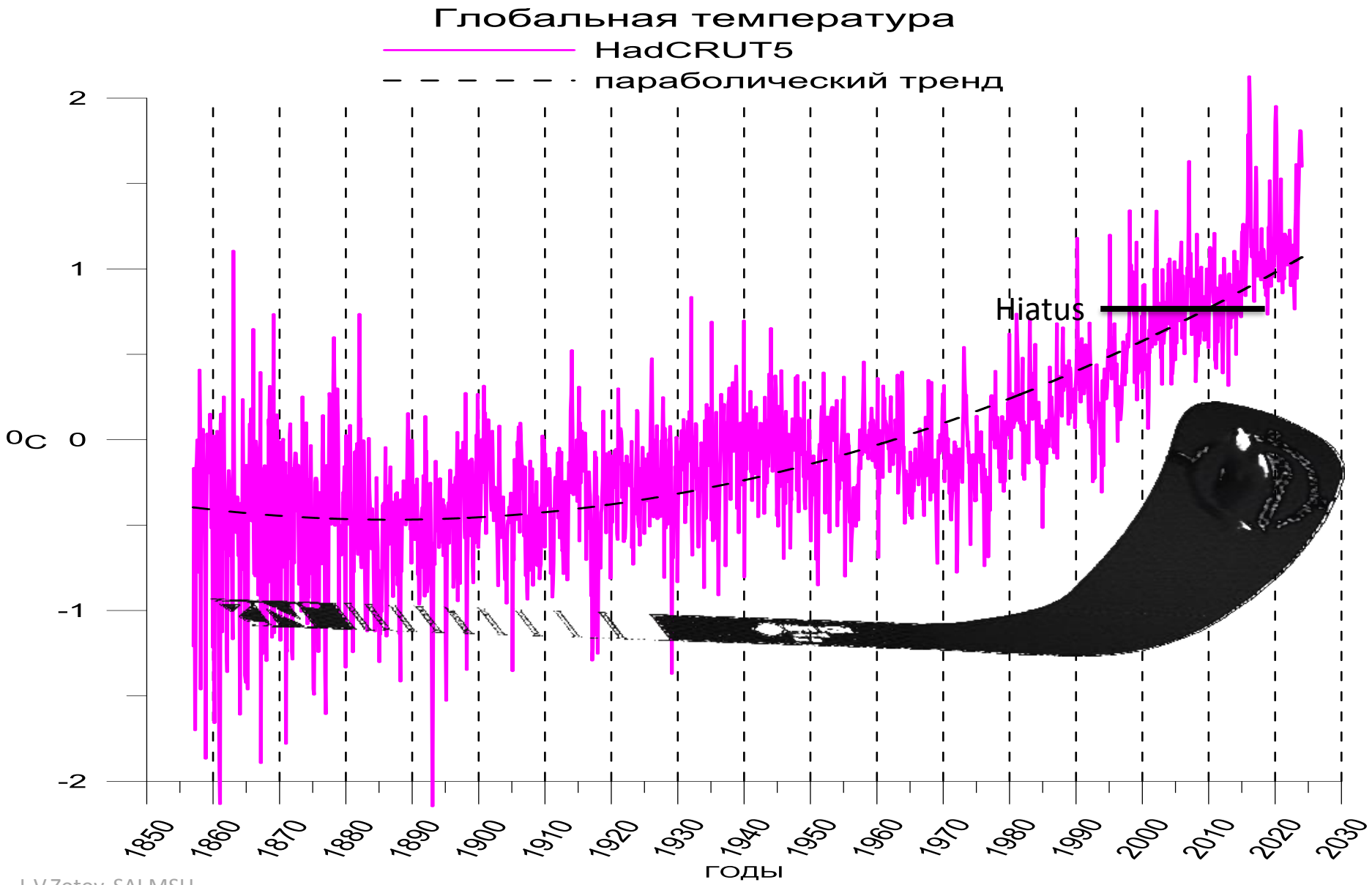






Зотов Л.В. и др., 2024

Глобальная температура на Земле



L.V.Zotov, SAI MSU

ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ И МНОГОЛЕТНЕЕ АТЛАНТИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ (АМО)

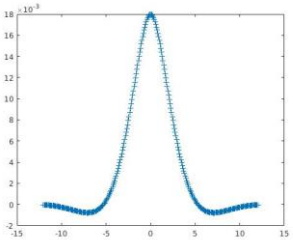
1

СГЛАЖИВАНИЕ ОСУЩЕМСТВЛЯЕМ ОПЕРАЦИЕЙ СВЕРТКИ

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)h(t-\tau)d\tau$$

2

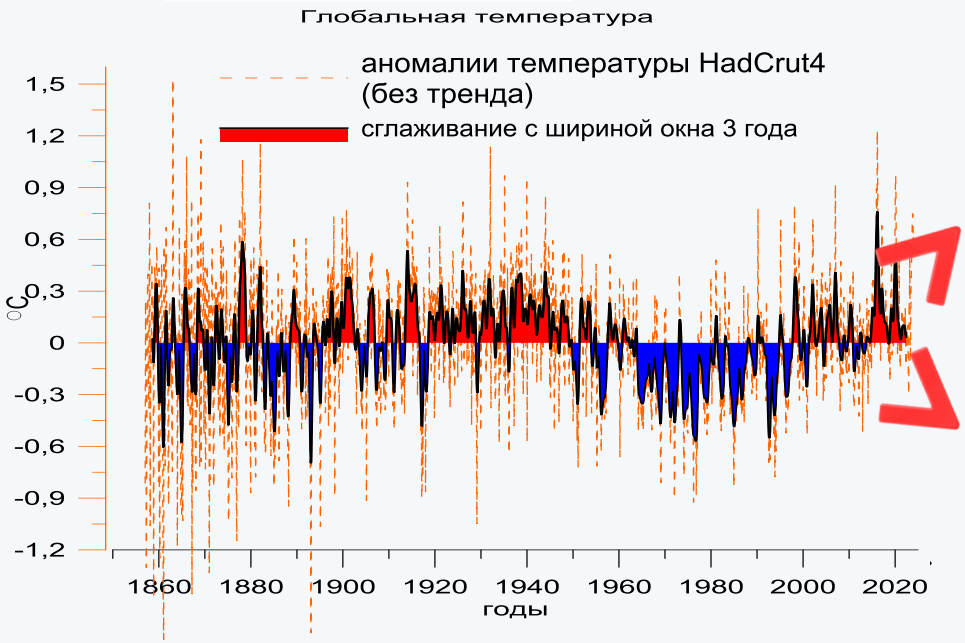
ИСПОЛЬЗУЕМ ВЕСОВОЕ ОКНО ПАНТЕЛЕЕВА



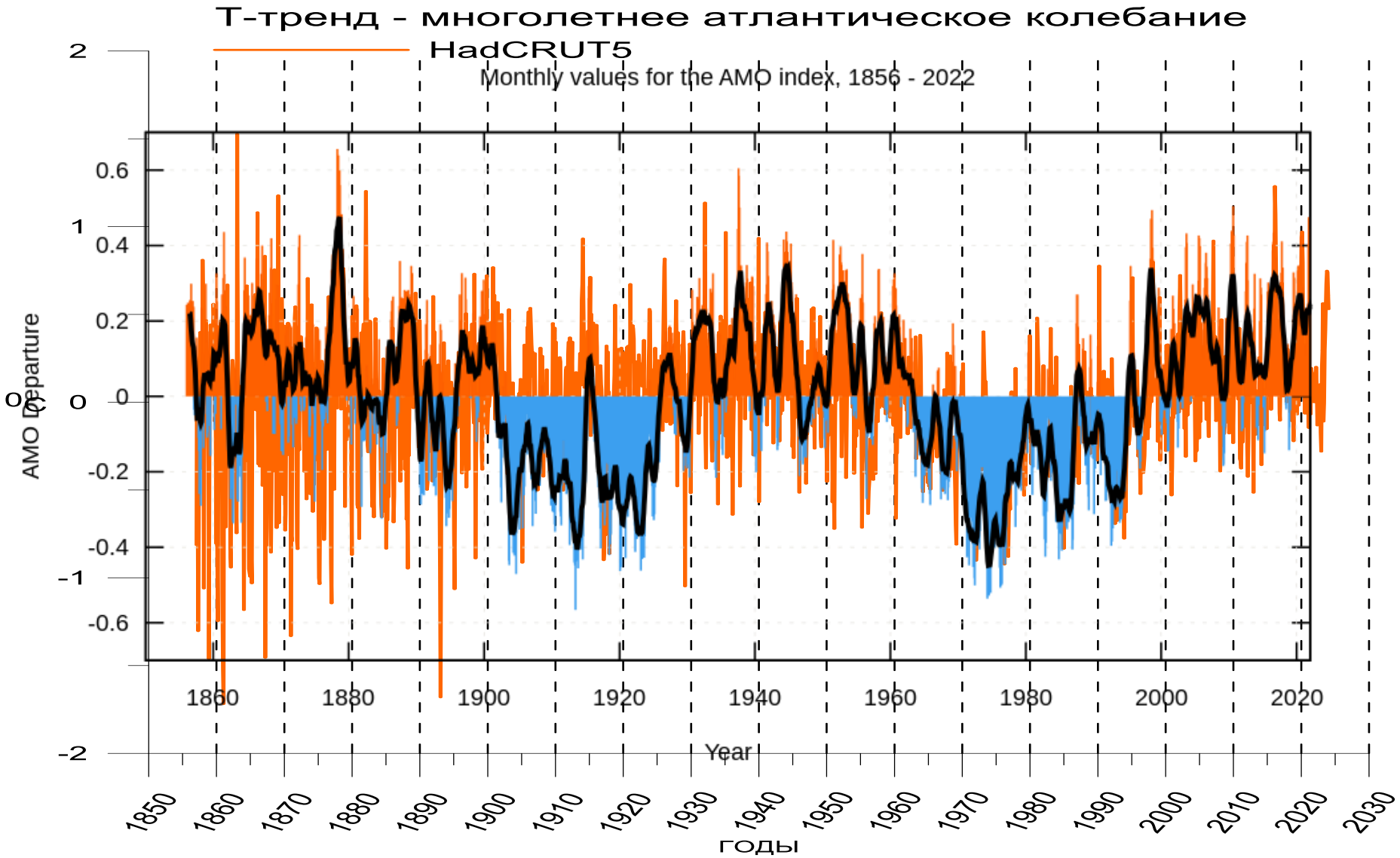
$$h(t) = \frac{\omega_0}{2\sqrt{2}} e^{-\left(\frac{\omega_0|t|}{\sqrt{2}} - i2\pi f_c t\right)} \left(\cos\frac{\omega_0 t}{\sqrt{2}} + \sin\frac{\omega_0|t|}{\sqrt{2}}\right)$$

3

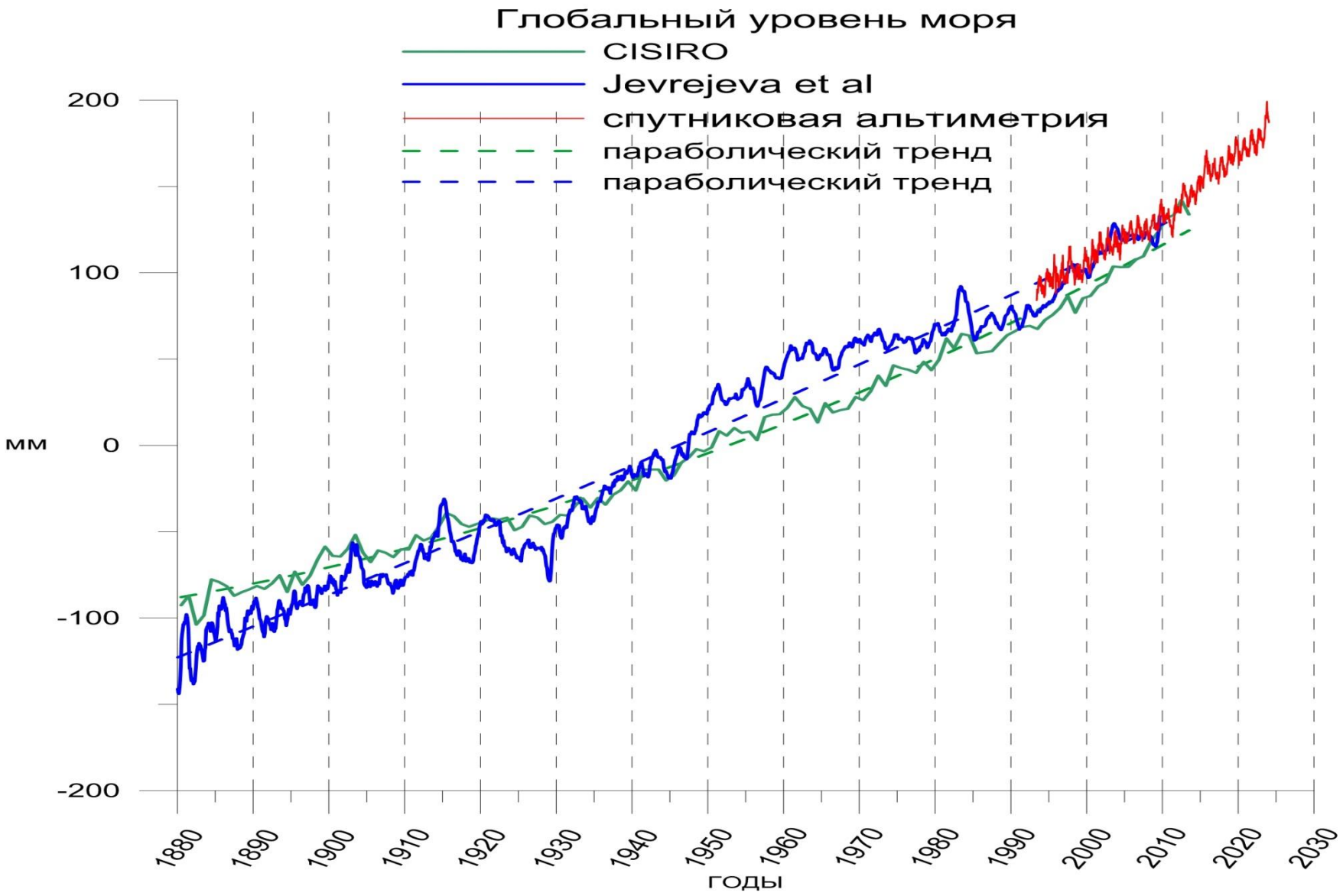
ТРЕНД МОДЕЛИРУЕМ ПАРАБОЛОЙ И ВЫЧИТАЕМ



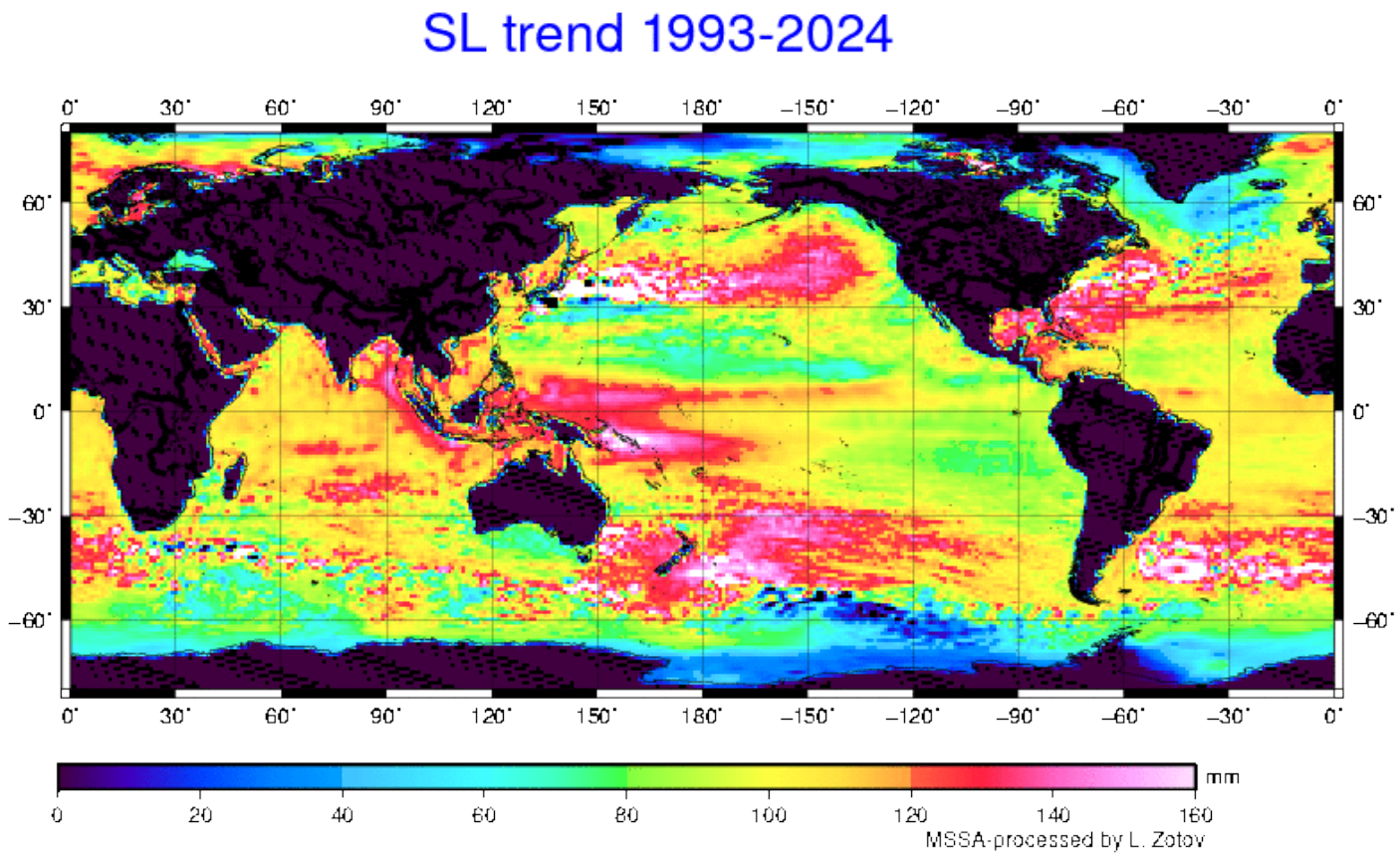
Многолетнее атлантическое колебание АМО



Глобальный рост уровня моря

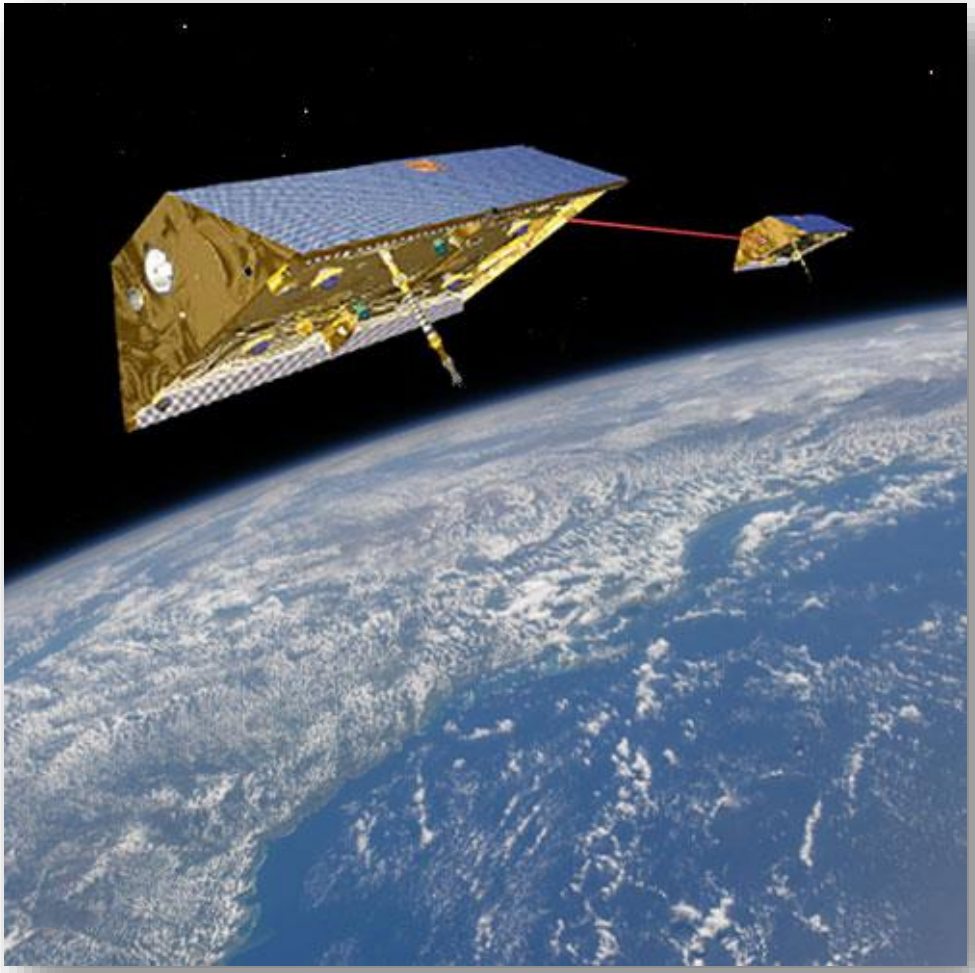


ДАННЫЕ СВОДНОЙ АЛЬТИМЕТРИИ ОКЕАНОВ



Показывают что под влиянием глобального потепления уровень моря поднимается в среднем на 3-4 мм в год

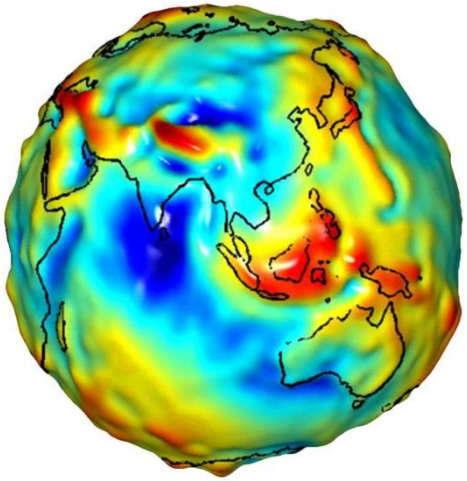
Как померить массу океана?



Спутники-близнецы GRACE
Gravity Recovery And Climate Experiment

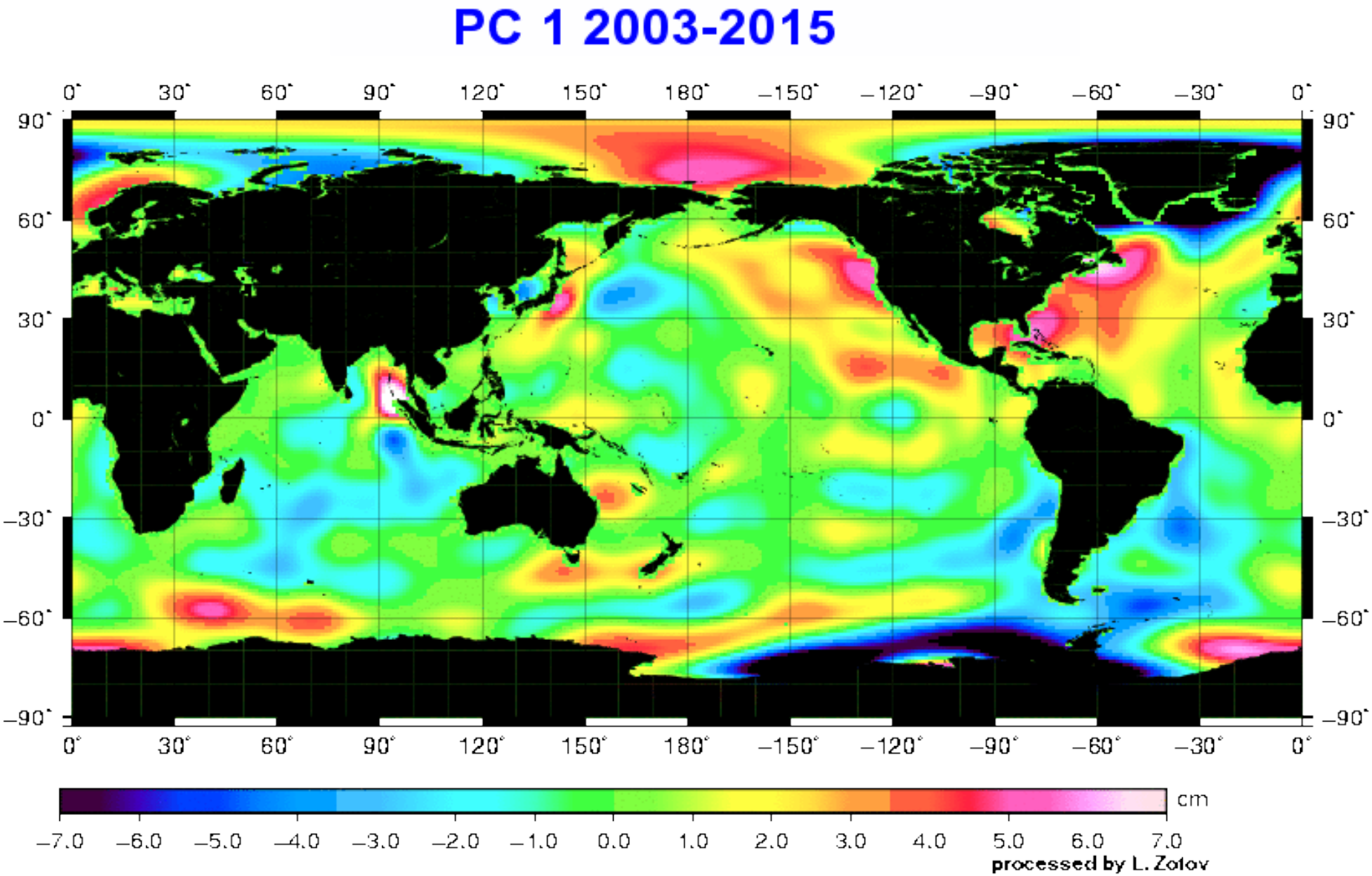
ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ МОРЯ

- Стерическая компонента
- Нестерическая компонента

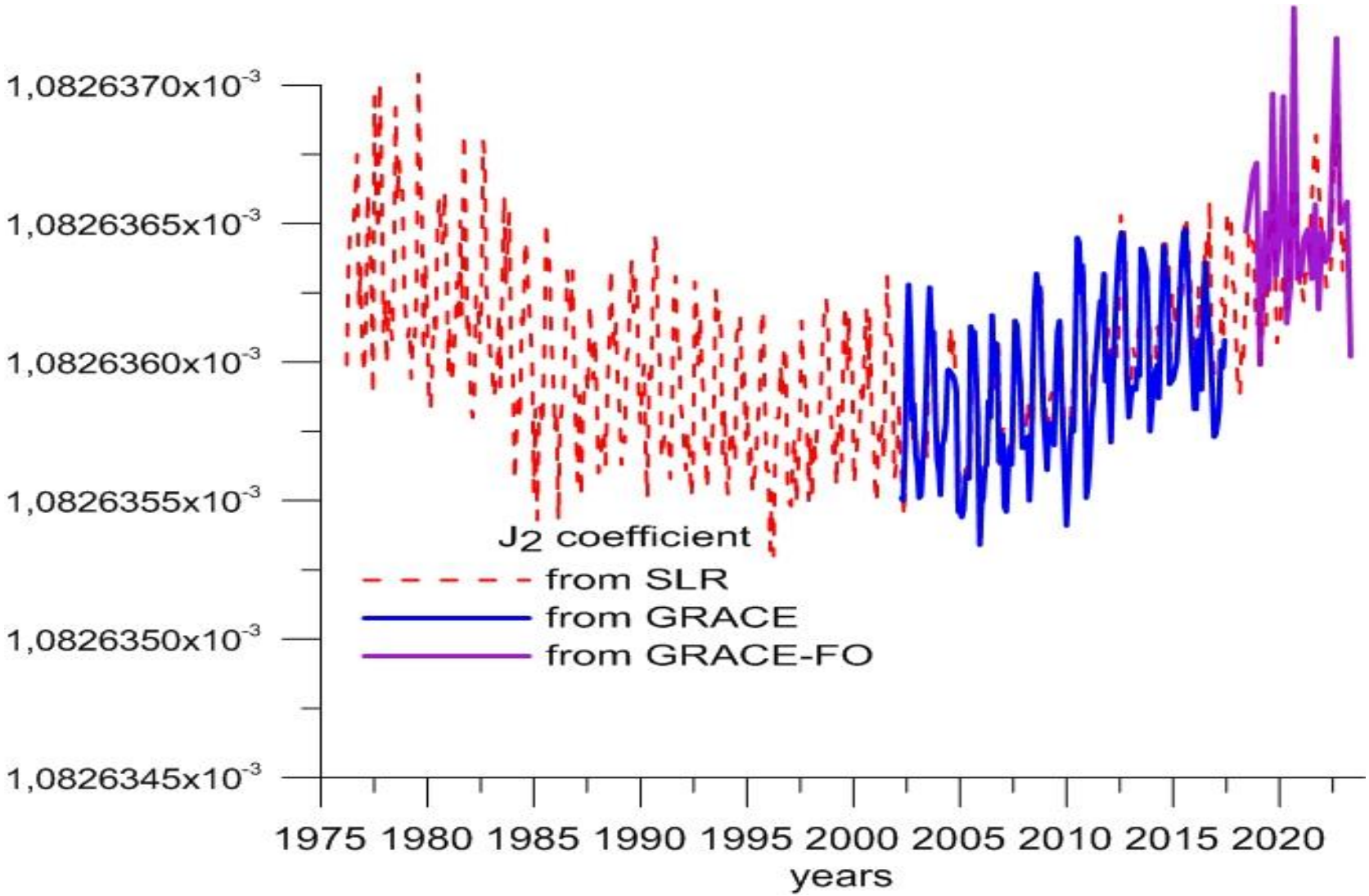


Визуализация гравитационной модели Земли по данным GRACE

Тренды придонного давления по данным GRACE Ocean Bottom Pressure (PC 1), Don Chambers data



Тренды в коэффициенте гравитационнго поля J_2 - сжатии геоида



Зотов Л.В. и др., 2024

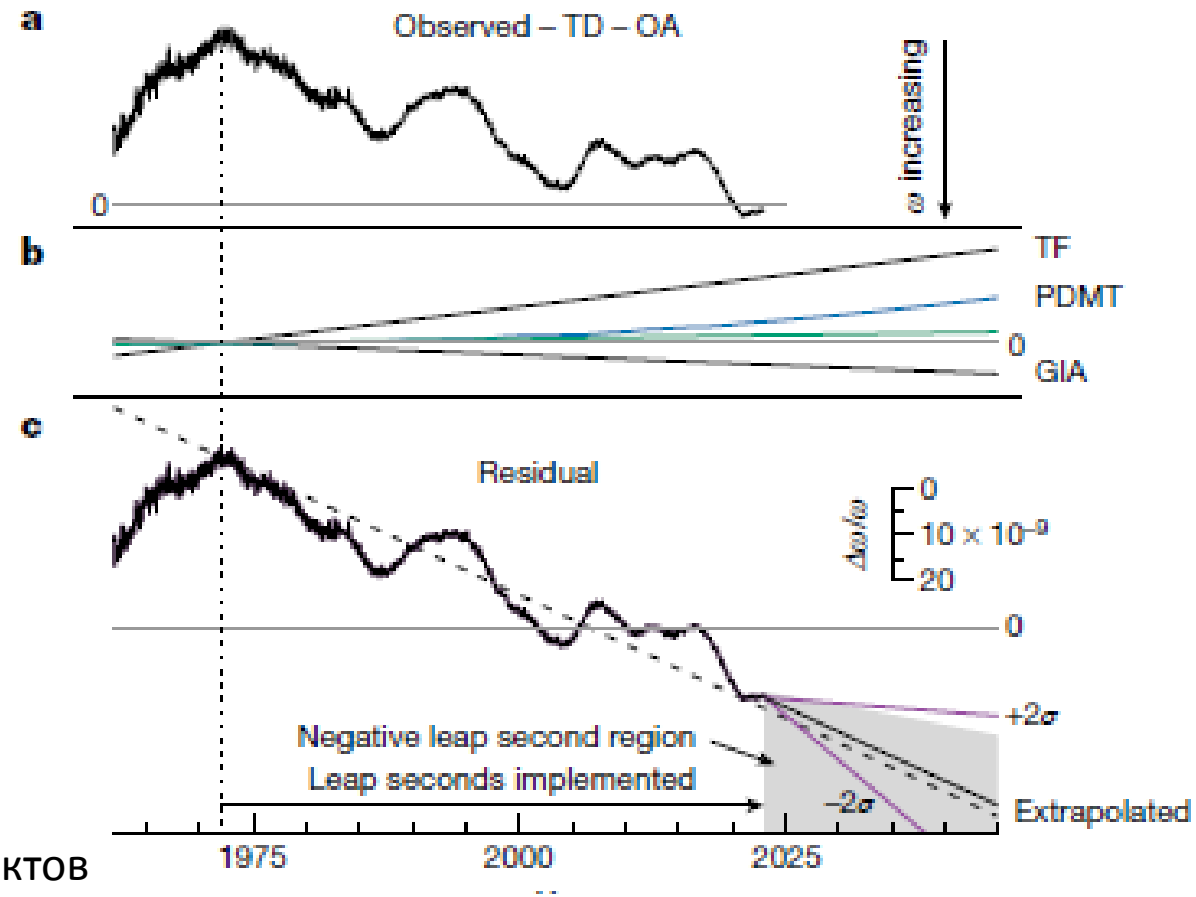
A global timekeeping problem postponed by global warming

https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0
Received: 4 August 2023
Accepted: 6 February 2024
Published online: 27 March 2024
Check for updates

Вверху – кривая LOD длительности суток

TF – приливное трение
GIA – послеледниковое поднятие
PDMT – перенос масс сегодня

внизу – как шла бы LOD за вычетом климатических эффектов



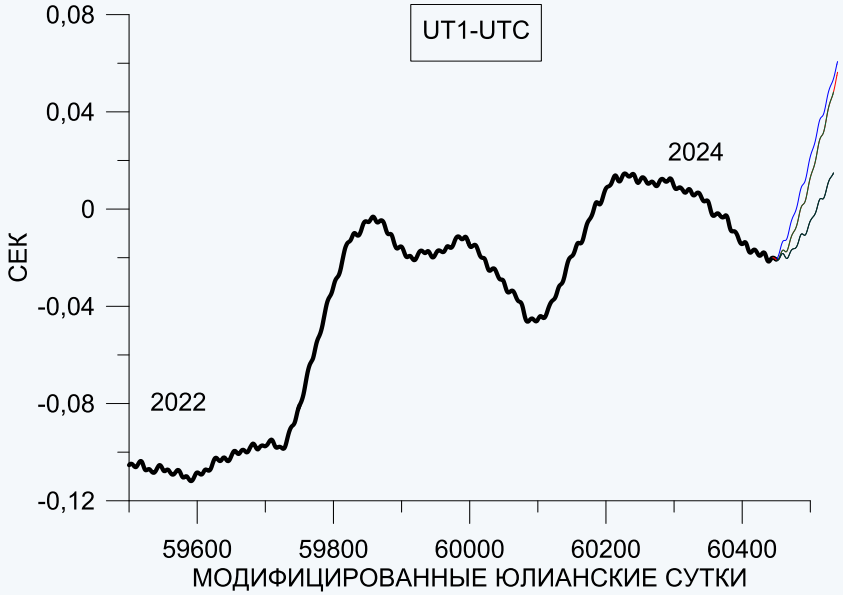
[1]Institute of Geophysics and Planetary Physics, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, La Jolla, CA, USA. [Ee]e-mail: dagnew@ucsd.edu

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ СЕКУНДА - LEAP SECOND

ВВОДИТСЯ ЧТОБЫ РАССОГЛАСОВАНИЕ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЯЕМОГО ПО ВРАЩЕНИЮ ЗЕМЛИ UT И ШКАЛЫ ВСЕМИРНОГО АТОМНОГО ВРЕМИНИ UTC НЕ ПРЕВЫСИЛО 0.9 СЕК

ОБЫЧНО ПРИБАВЛЯЛАСЬ В КОНЦЕ ГОДА К UTC, НО СЕГОДНЯ ВСТАЛ ВОПРОС О ЕЕ ВЫЧИТАНИИ

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



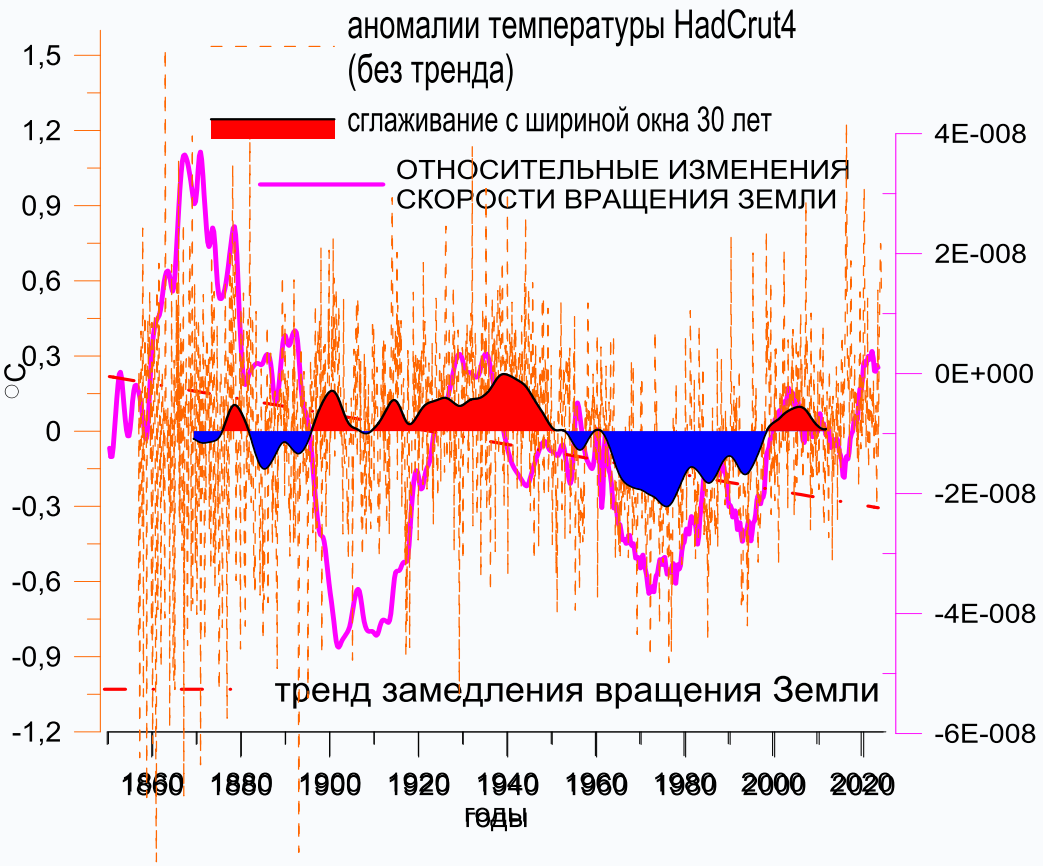
ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ И КЛИМАТ

ЕСЛИ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ И ТЕМПЕРАТУРА НА ПЛАНЕТЕ ВЗАИМОСВЯЗАНЫ

То тенденции в одном можно использовать для прогнозирования другого.

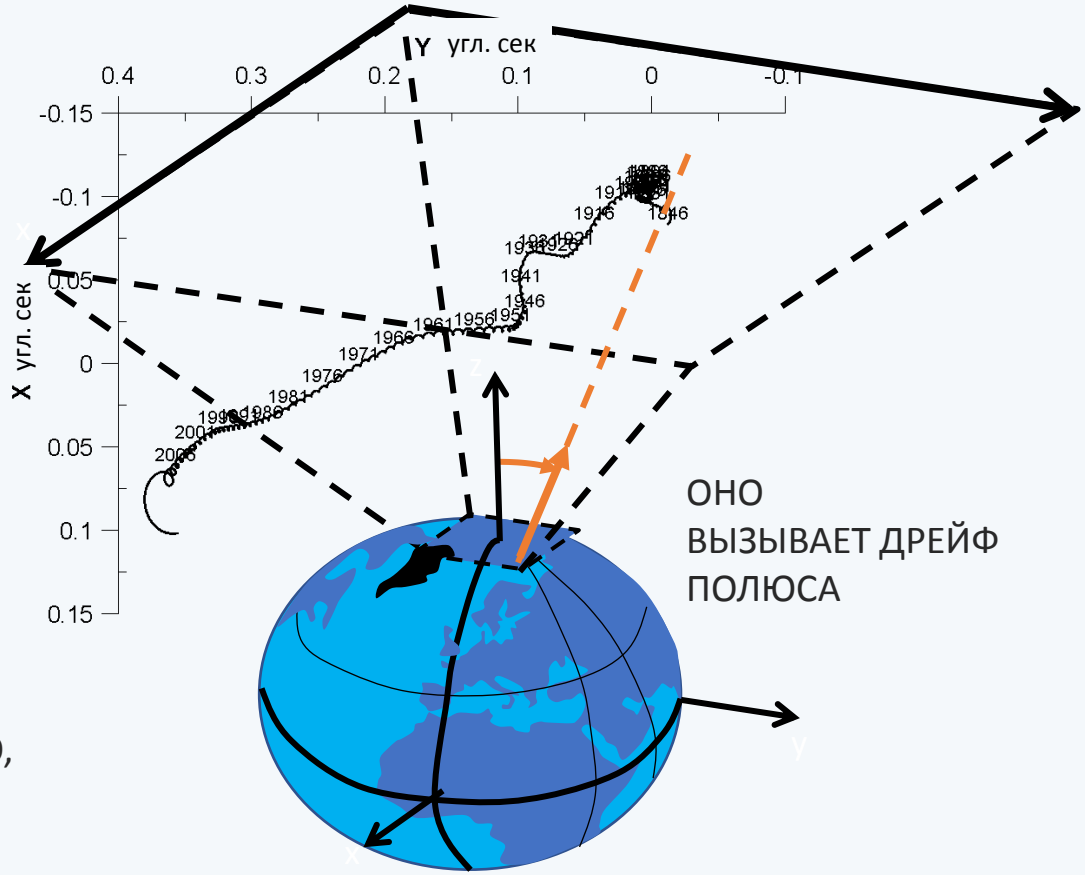
Температуры над Атлантикой завернули вниз, → скорость вращения Земли вероятно тоже пойдет вниз (на замедление).

Поэтому стандарт введения Добавочной Секунды
пересматривать преждевременно.



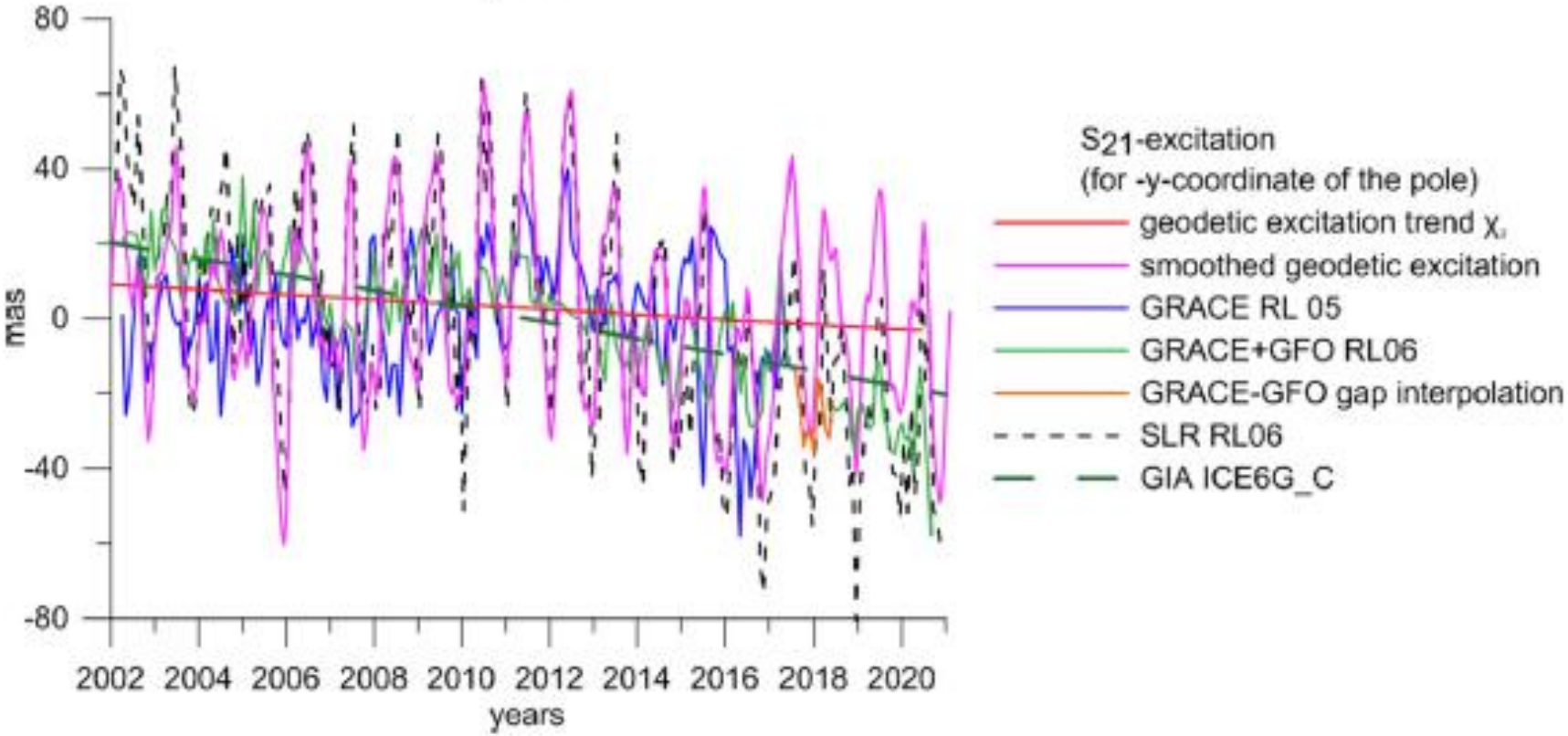
КАК ТАЯНИЕ ЛЕДНИКОВ ВЛИЯЕТ НА ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ?

ОНО ДОПОЛНИТЕЛЬНО ТОРМОЗИТ ЗЕМЛЮ, ОТДАЛЯЯ ВЫЧИТАНИЕ СЕКУНДЫ



ОНО ВЫЗЫВАЕТ ДРЕЙФ ПОЛЮСА

Согласие коэффициентов C_{21} S_{21} по SLR и GRACE с трендами движения полюса

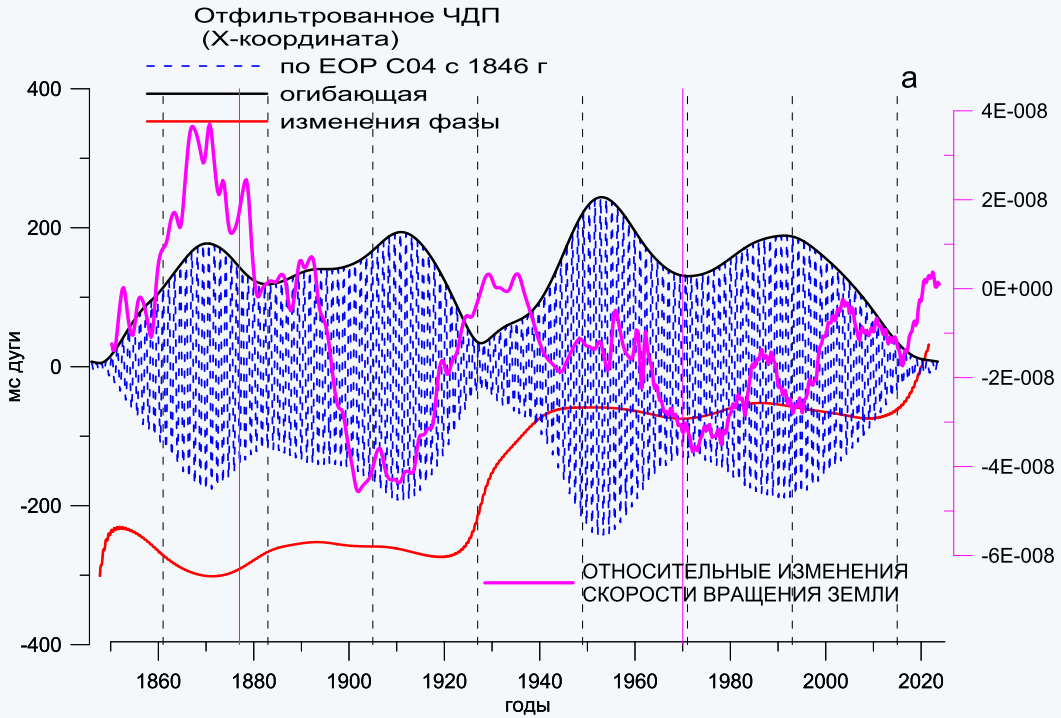


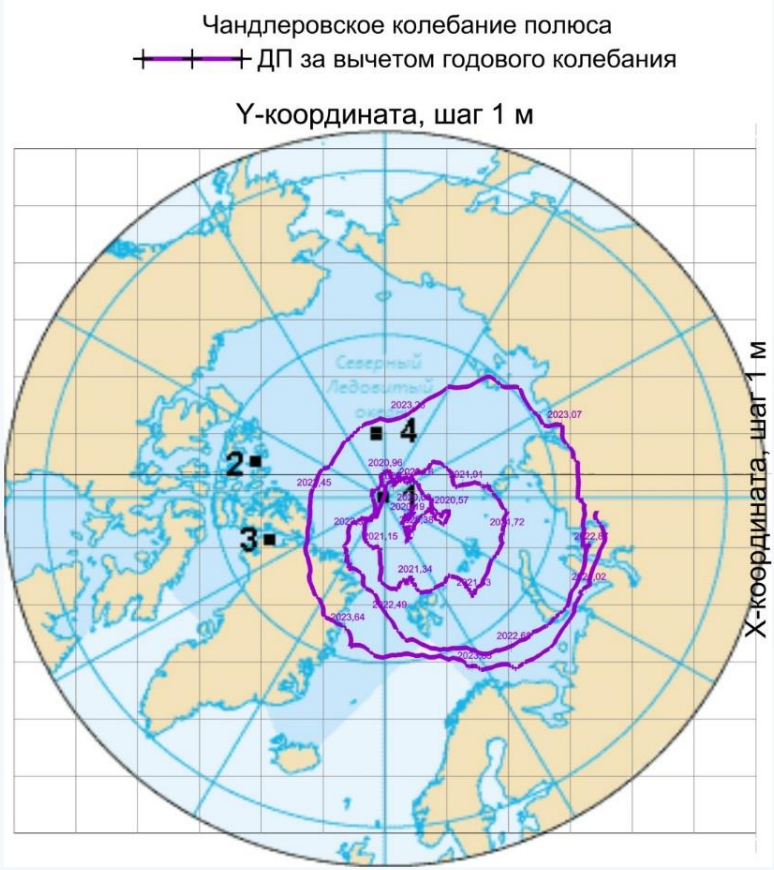
Климатологическое перераспределение масс ответственно за дрейф полюса.

Leonid Zotov, Christian Bizouard, C.K. Shum, Vera Zinovieva, Analysis of the Second Degree Stokes Coefficients of Geopotential and Earth Rotation Trends, AIP proceedings & EGU-2018

ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ЧАНДЕРОВСКОГО КОЛЕБАНИЯ ПОЛЮСА

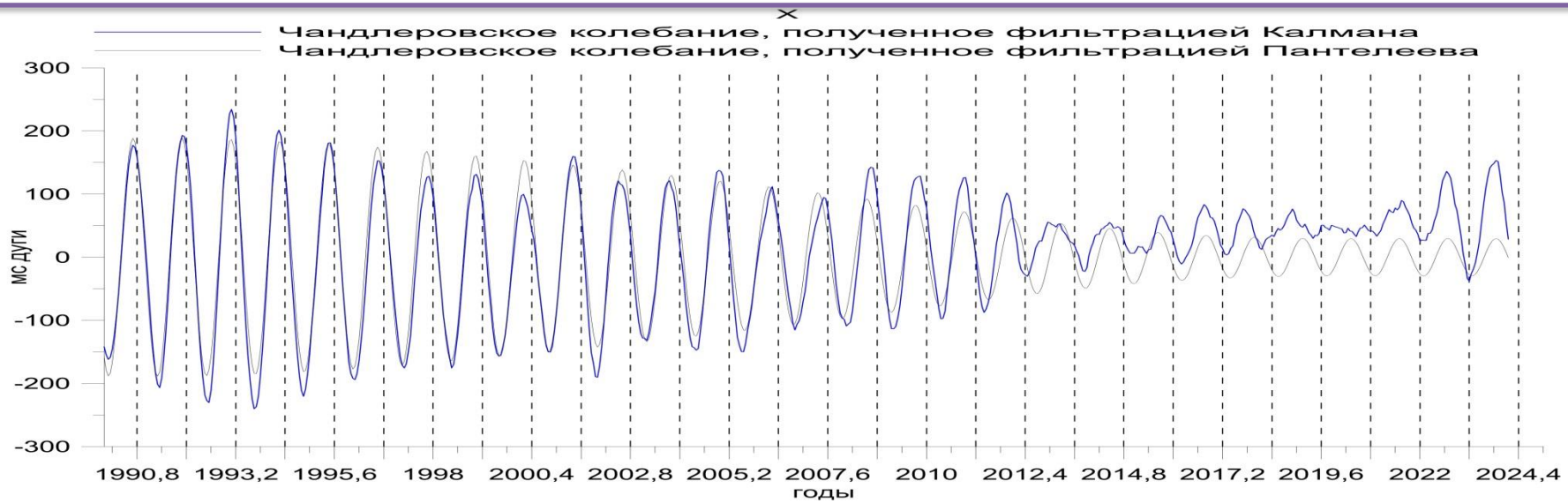
В 2017-2020 гг ЗАТУХЛО ЧАНДЛЕРОВСКОЕ КОЛЕБАНИЕ ПОЛЮСА

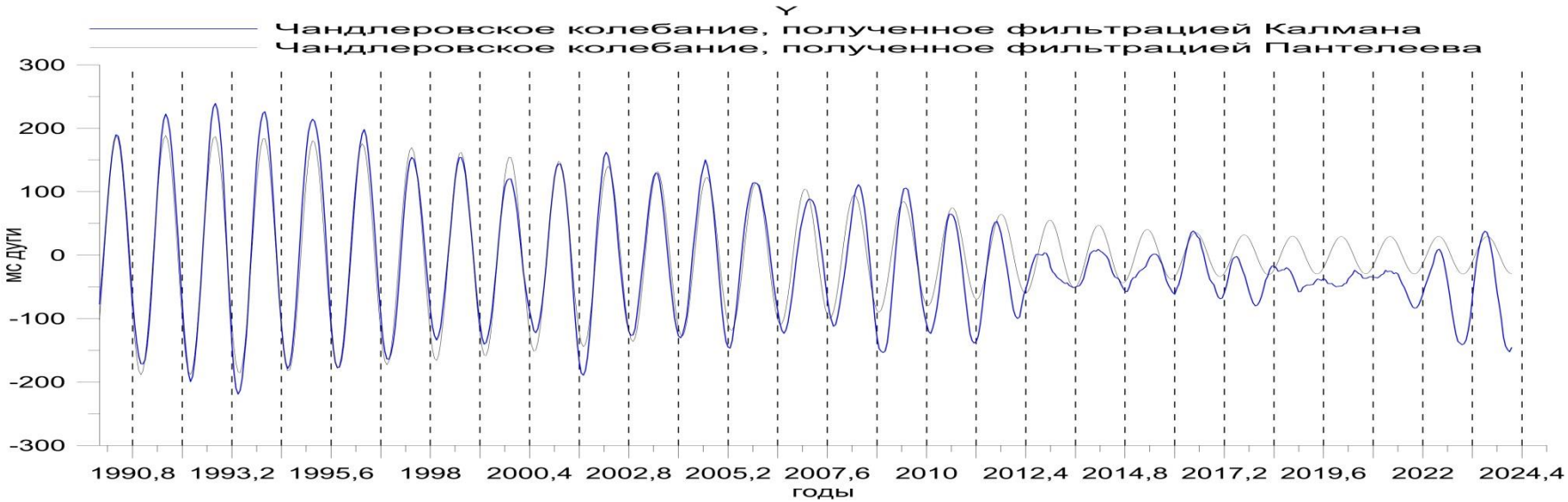




В 2021 ОНО СНОВА ПОШЛО, ПЕРЕВЕРНУВШИСЬ

Чандлеровское колебание сегодня



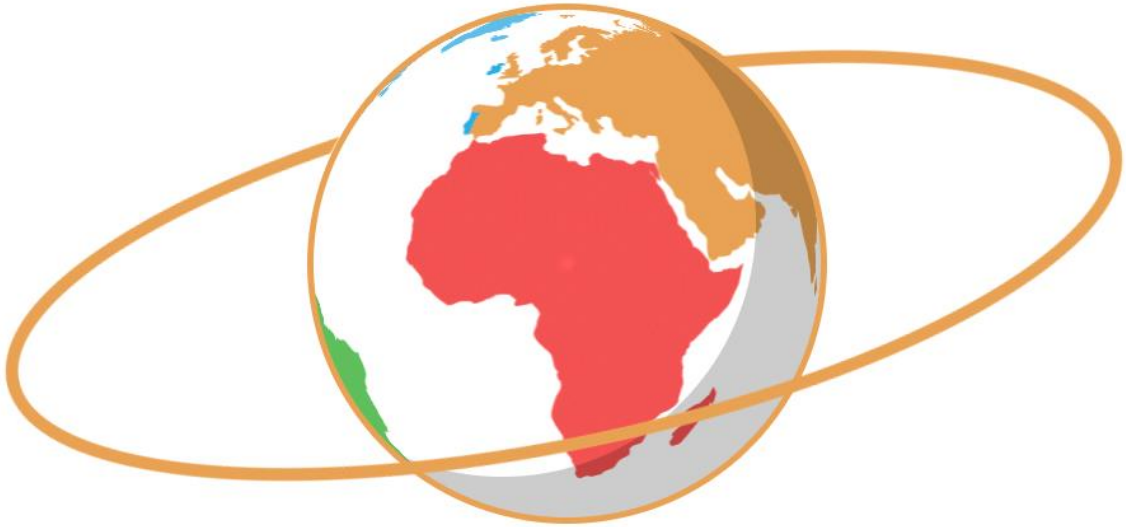


Zotov L.V. et al., 2024

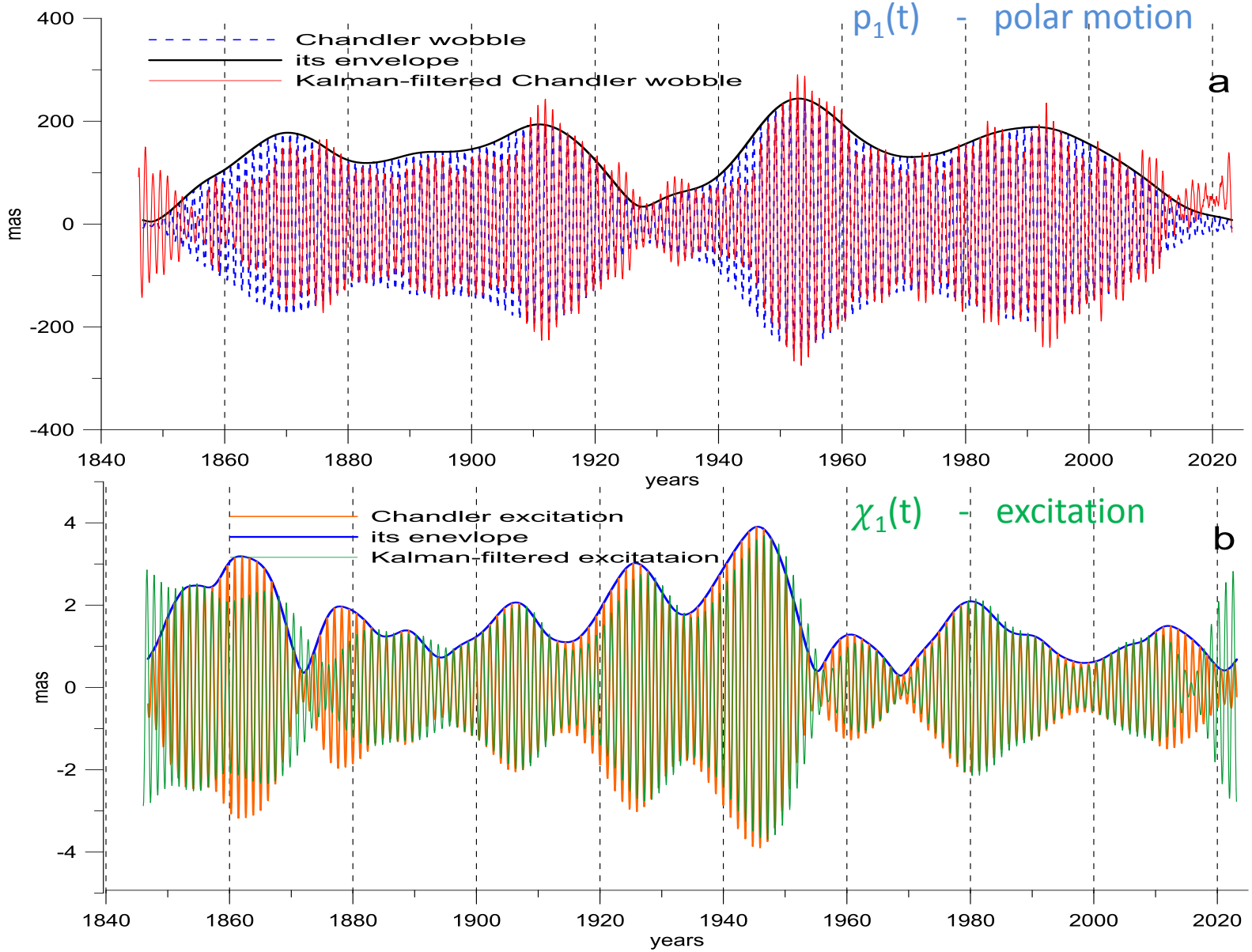
Выводы

- данные GRACE и GFO по гравитационному полю Земли незаменимы для многих геофизических приложений
- гравитационное поле над большими территориям отражает динамику климатических воздействий на ледники, вечную мерзлоту, океан, водный баланс суши
- вычисленные аномалии в бассейнах рек показывают тенденции, могут служить основой мониторинга наводнений и их прогнозирования
- данные космической гравиметрии по первым коэффициентам гравитационного поля Земли – сжатию J_2 и асимметрий C_{21}, S_{21} помогают определить вклад перераспределений масс в аномалии вращении Земли
- необычное ускорение во вращении Земли, аномалии в дрейфе полюса и Чандлеровском колебании, разворот тренда температур над Атлантикой приходятся на нашу эпоху (2020е) и отражают глобальную активность планеты в текущую эпоху

Спасибо за внимание!



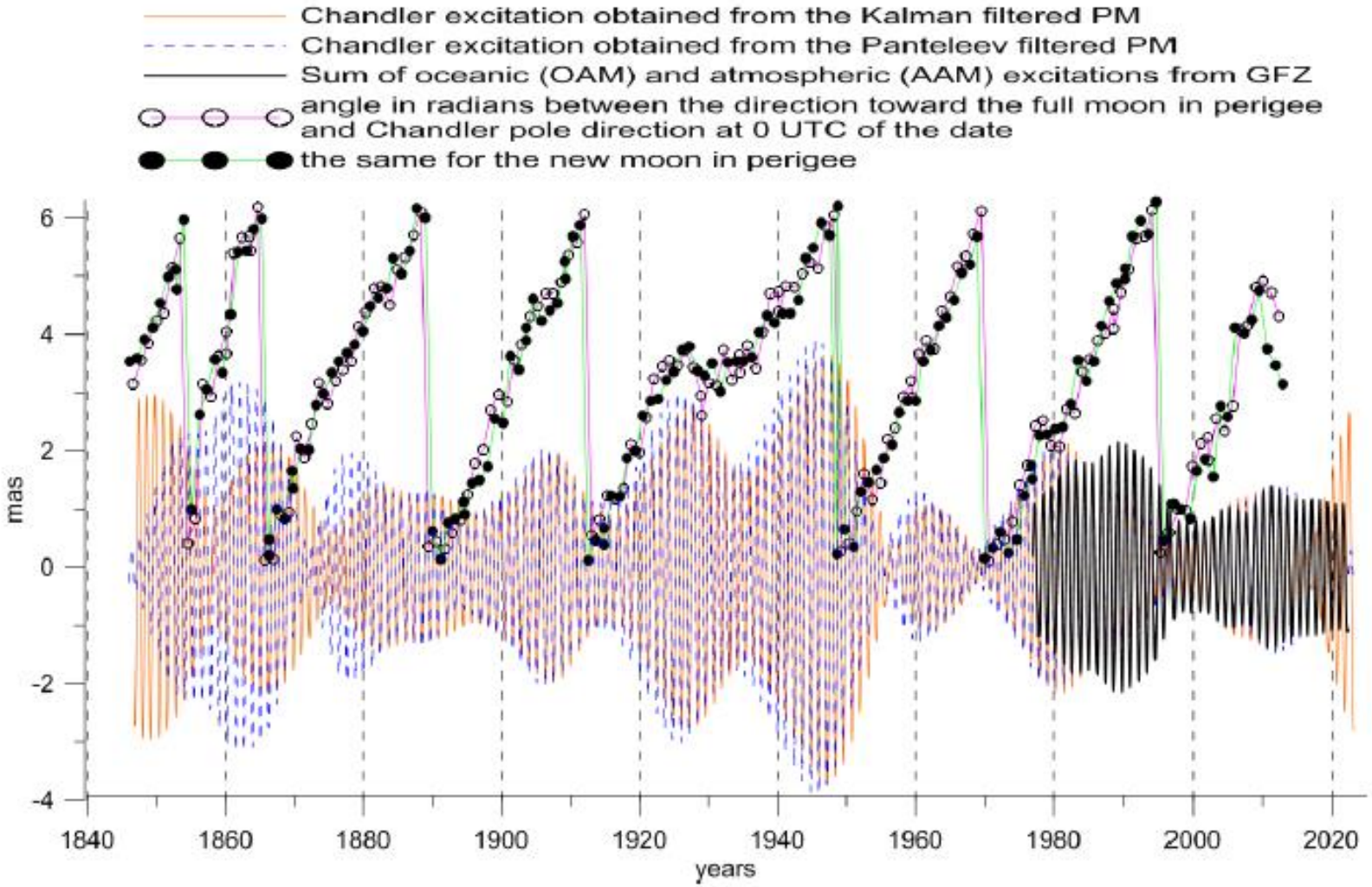
Чандлеровское колебание *p* и его возбуждение χ



Зотов Л.В. и др., 2024

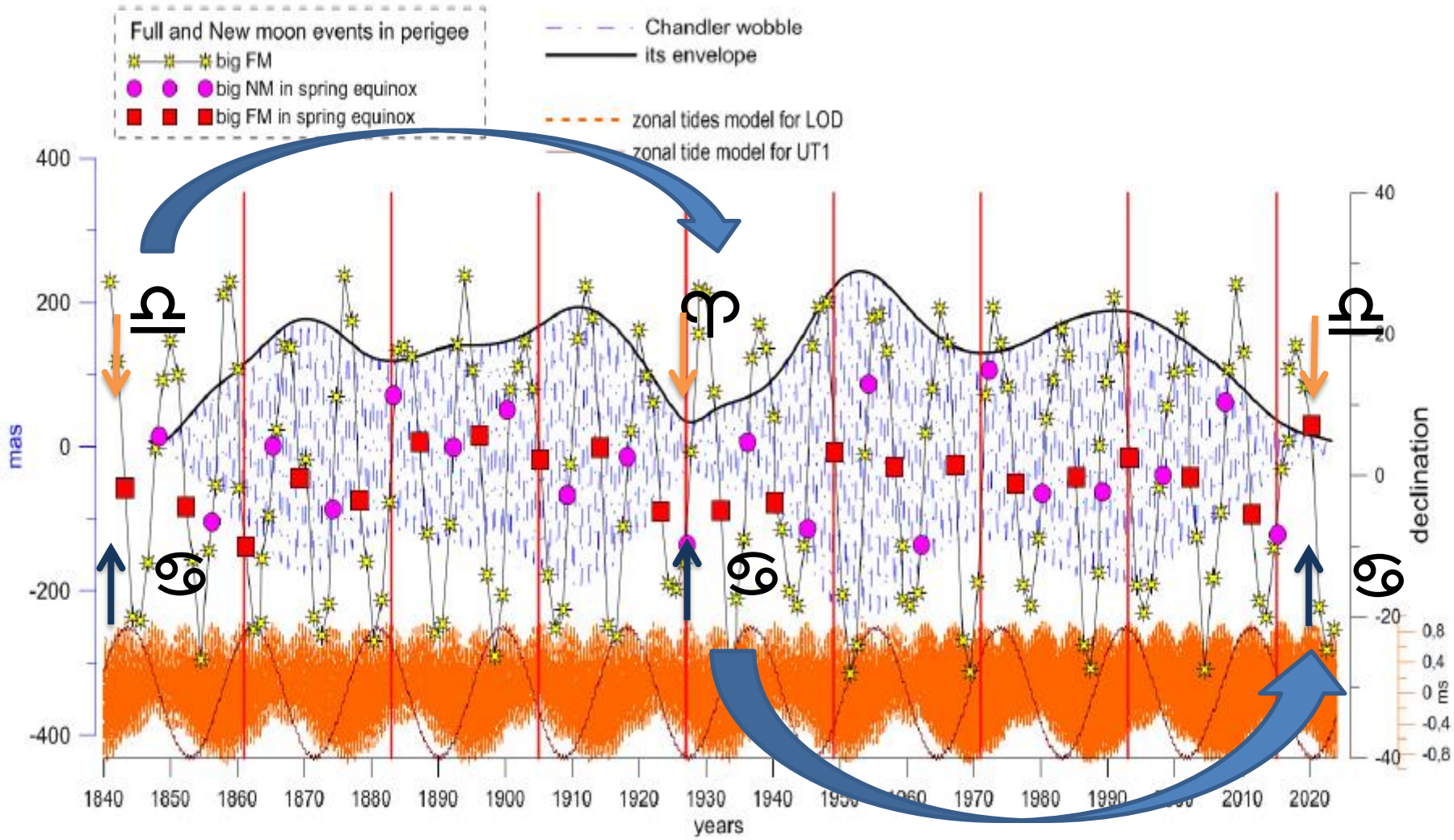
Отставание ЧДП от 412-суточного цикла больших полнолуний

$$\frac{1}{411.7} - \frac{1}{\text{от 431 до 434}} \approx \frac{1}{\text{от 25 до 21 года}}$$



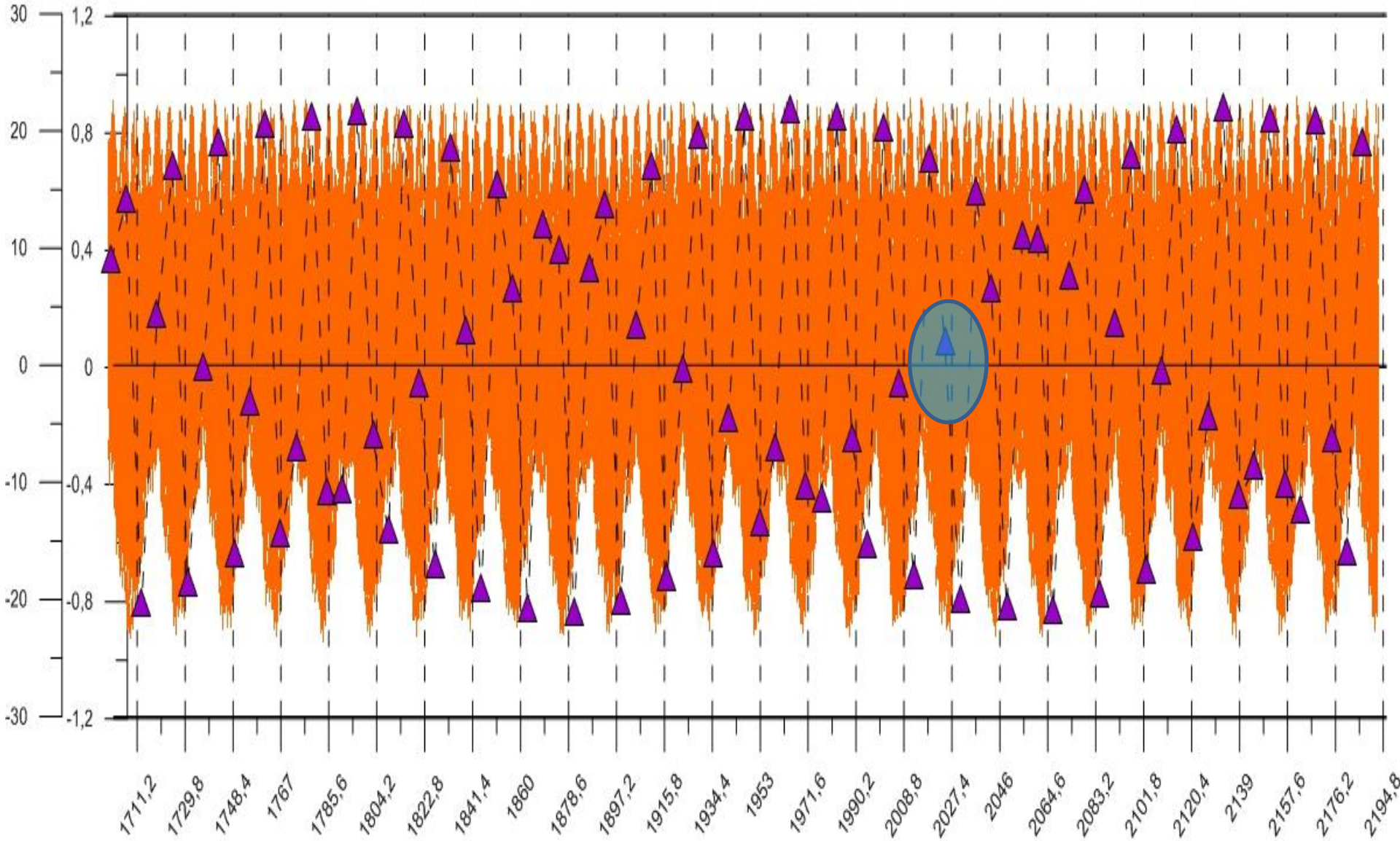
Зотов Л.В. и др., 2024

Причина раскачки и подавления Чандлеровского колебания



L. Zotov, Anomalies in the Earth rotation and Syzygies in Perigee, at Industry 4.0 VIII, Iss. 5, p. 166-168, 2023 WEB ISSN 2534-997X; PRINT ISSN 2534-8582

Встречи перигея и узла каждые 6 лет и их склонения



Зотов Л.В. и др., 2024