



Успехи миссий GRACE и GRACE-FO по изучению гравитационного поля Земли

Зотов Л. В.(1,2), Лыгин И. В.(3), Ткаченко Н.С.(3), Фролова Н. Л.(4)

*1) Государственный астрономический институт
имени П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова*

2) МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, Россия

3) Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова

4) Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова

12 ноября 2019 г. ИКИ РАН, Москва

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

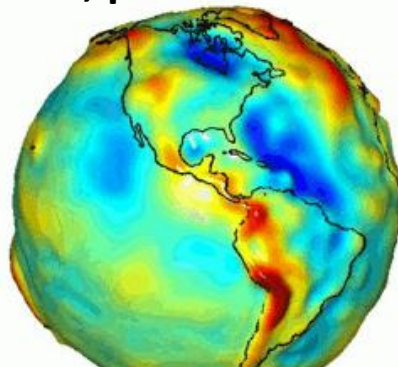
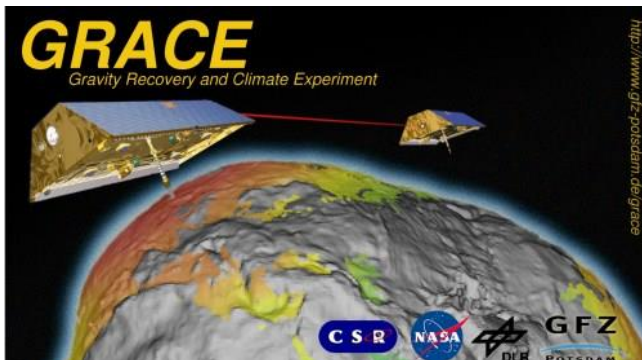
Миссии по исследованию гравитационного поля

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

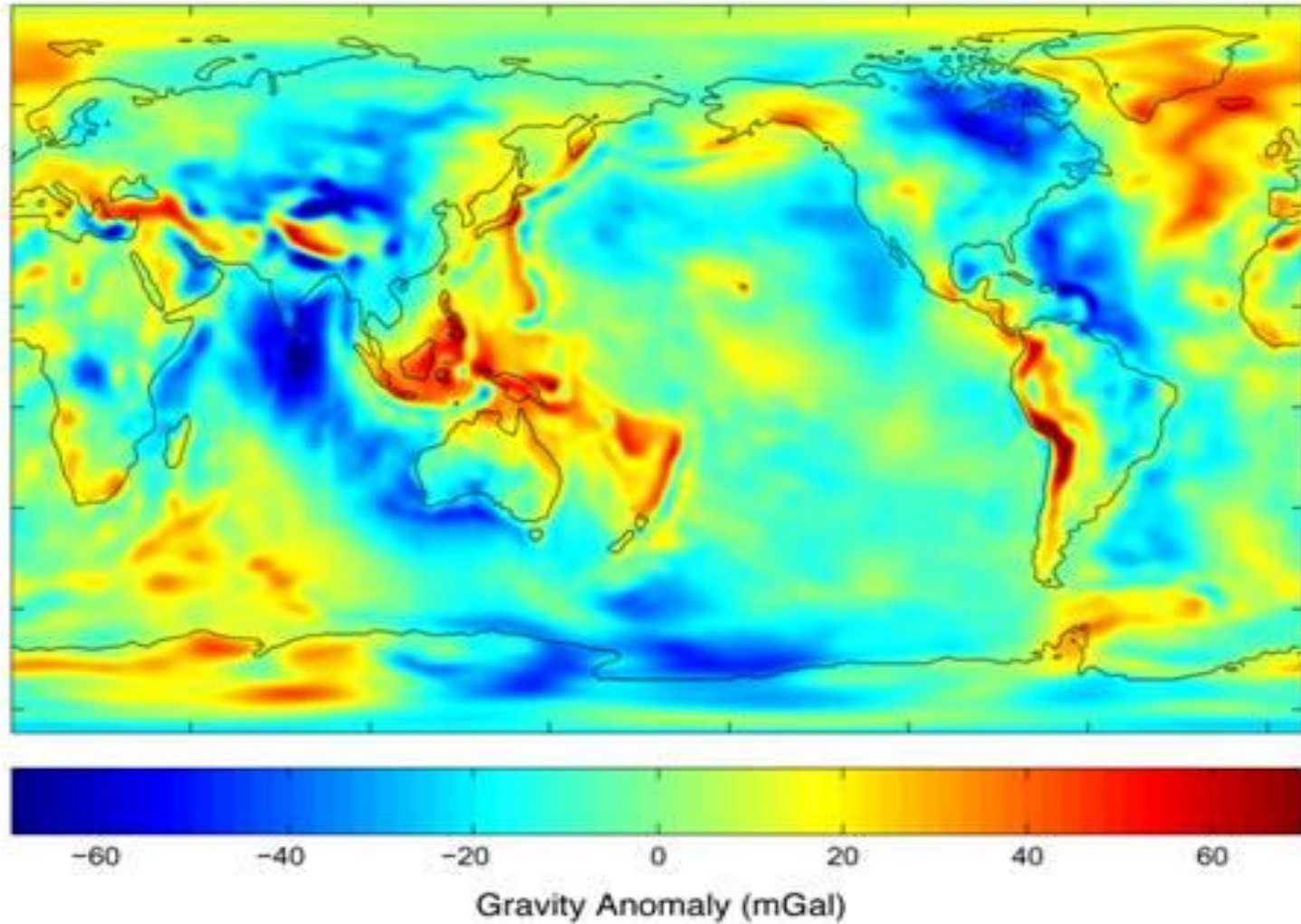
GRACE - эксперимент по исследованию гравитационного поля и климата, два спутника – близнеца, разработанные NASA/DLR, запущены с космодрома Плесецк 17 марта 2002 г. Спутники следуют один за другим на расстоянии ~ 220 км по околополярной орбите на высоте ~ 500 км, покрывая Землю за ~ 30 суток. Основными измеряемыми величинами являются расстояние между спутниками и его изменения под влиянием ускорений, обусловленных пролетами над притягивающими массами. Миссия закончила работу в 2017 г.

GOCE - запущен в марте 2009 г. на орбиту высотой 260 км. С помощью высокоточного градиентометра получена высокоточная модель Гравитационного поля. Погрешность высот геоида 1 см при разрешении 100 км, менее 1 мм для больших пространственных частот. Отработав, спутник упал 11 ноября 2013 г. в океан.

GRACE Follow-On – пришли на смену GRACE запущены NASA ракетой SpaceX Falcon 9 22 мая 2018 г. Высота 491 км, расстояние между спутниками 181 км.



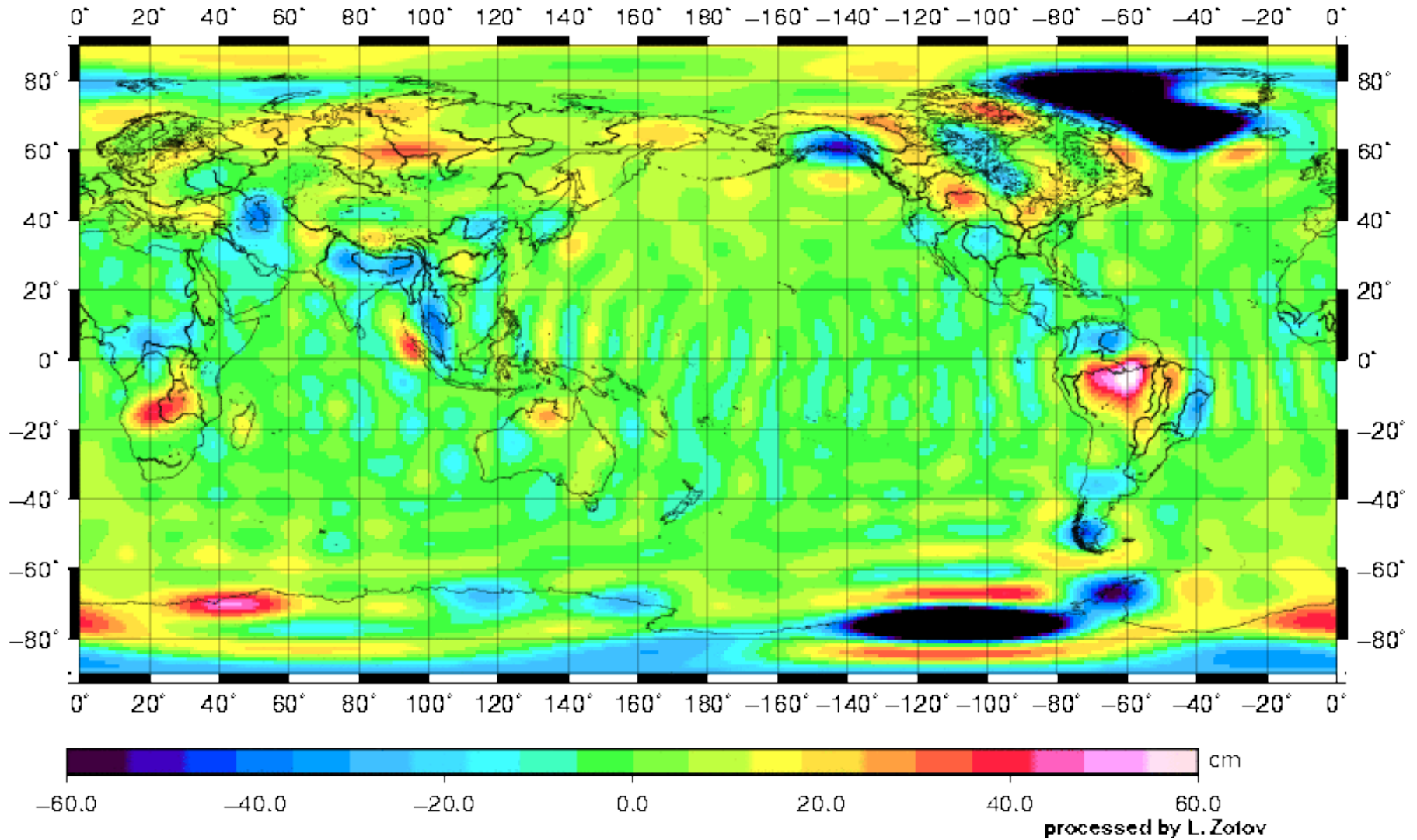
Гравитационное поле Земли по данным GRACE (GGM03s)



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

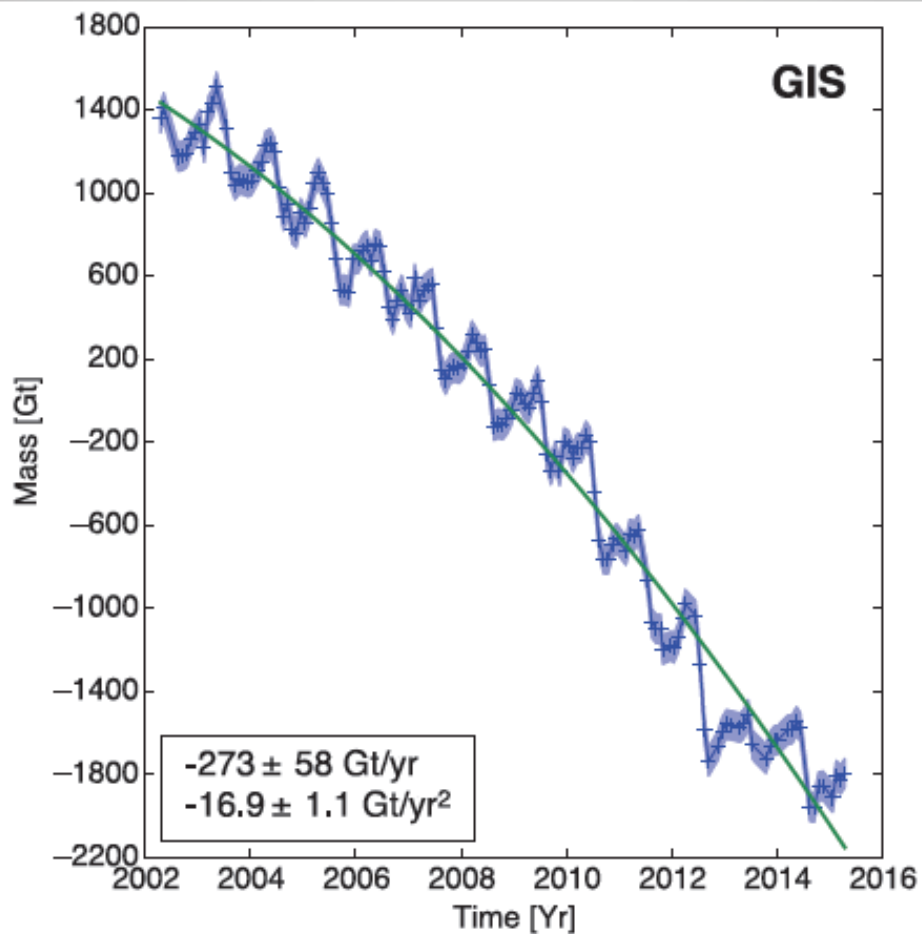
Климатические тренды в данных миссии GRACE

2015-2003



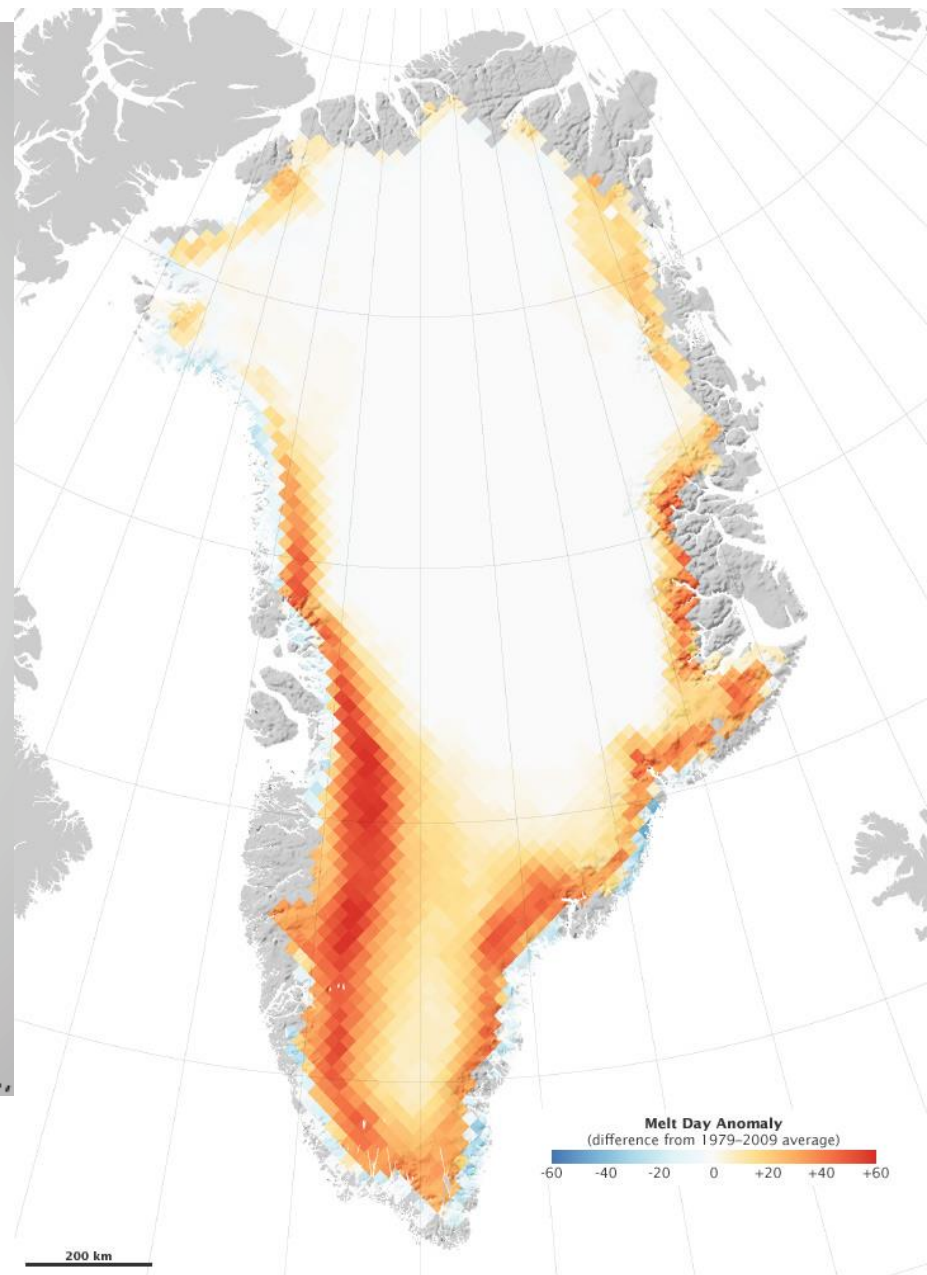
Изменения масс вследствие климатических и др. факторов

Гренландия 1979-2017

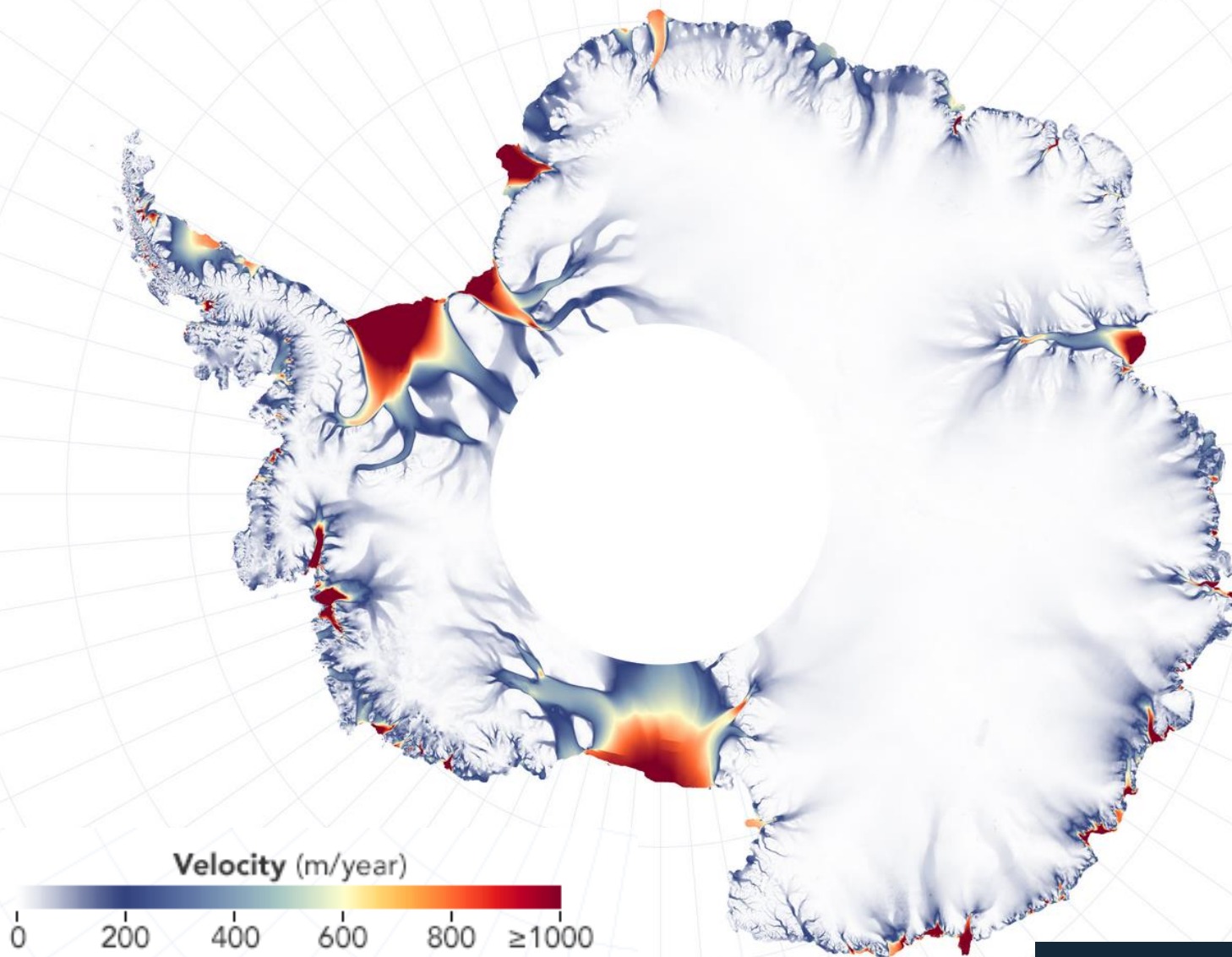


Greenland ice sheet and surrounding glaciers/ice caps

Updated from Velicogna et al.,

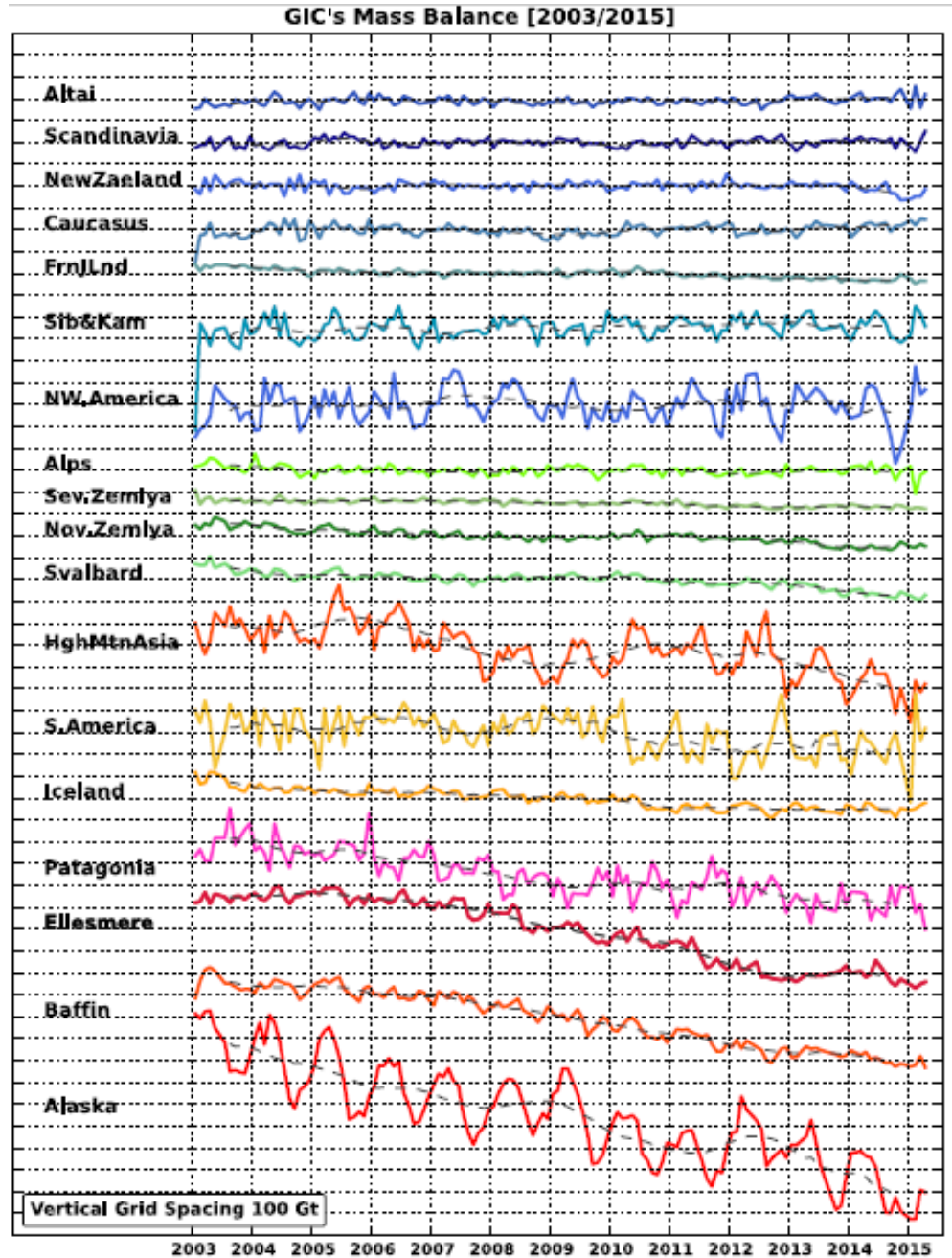
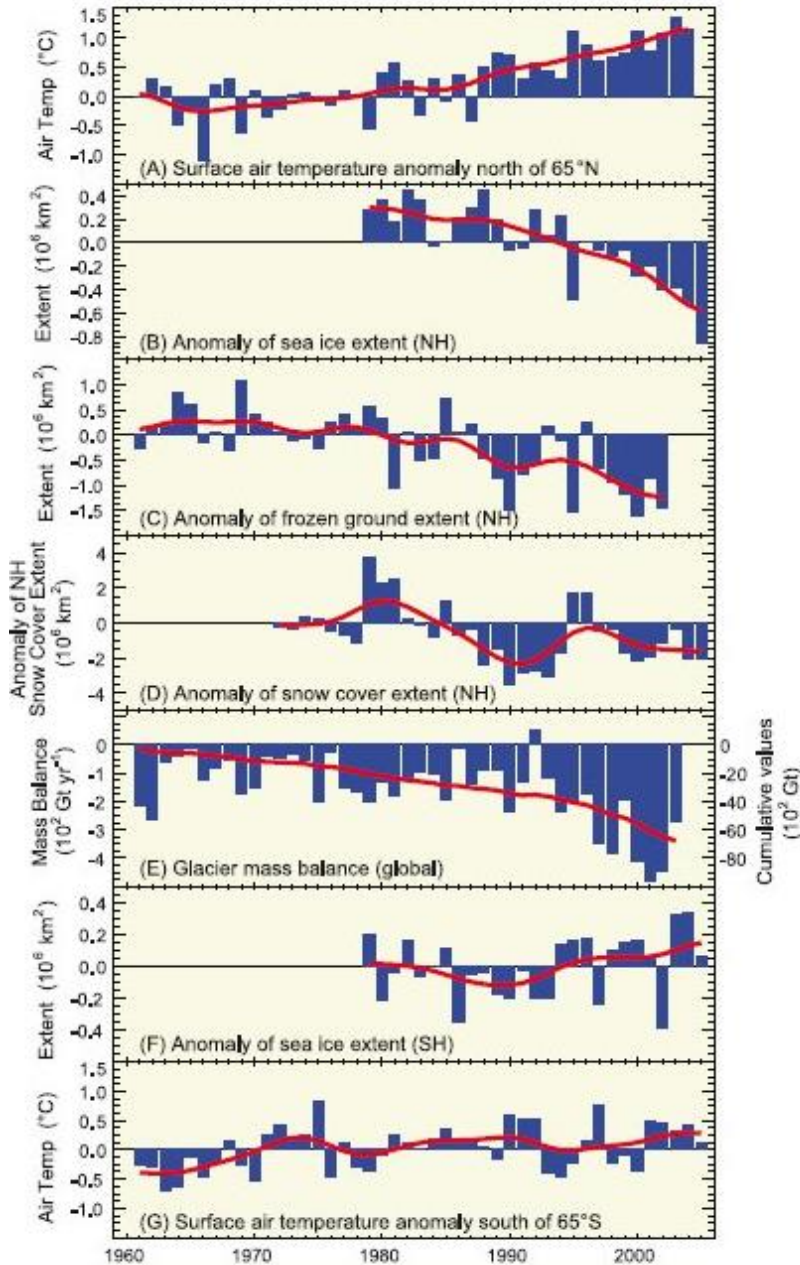


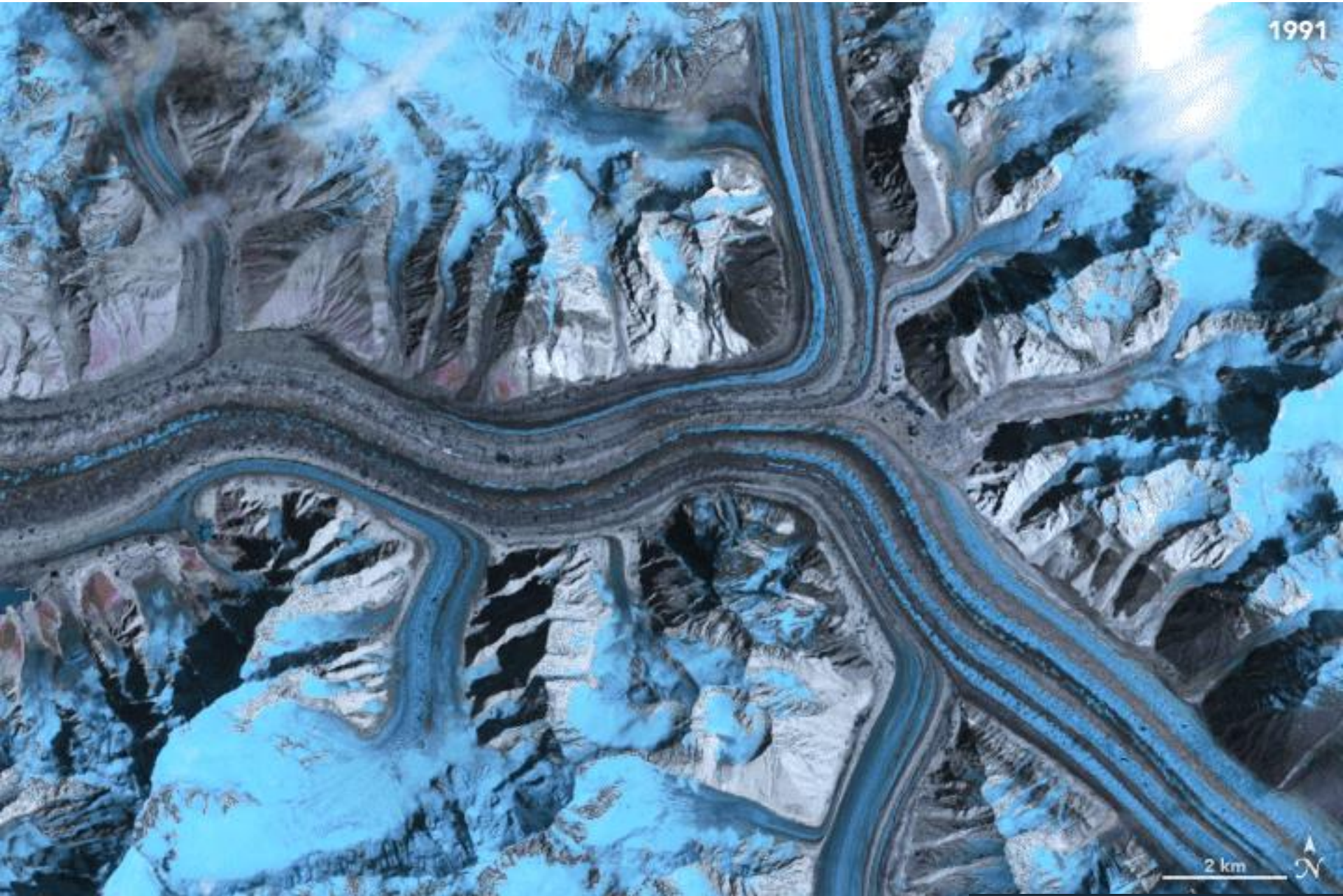
Просыпающиеся ледники Антарктиды 2013 - 2018



Time Series of Land Ice Velocity and Elevation, or ITS_LIVE

Ледники



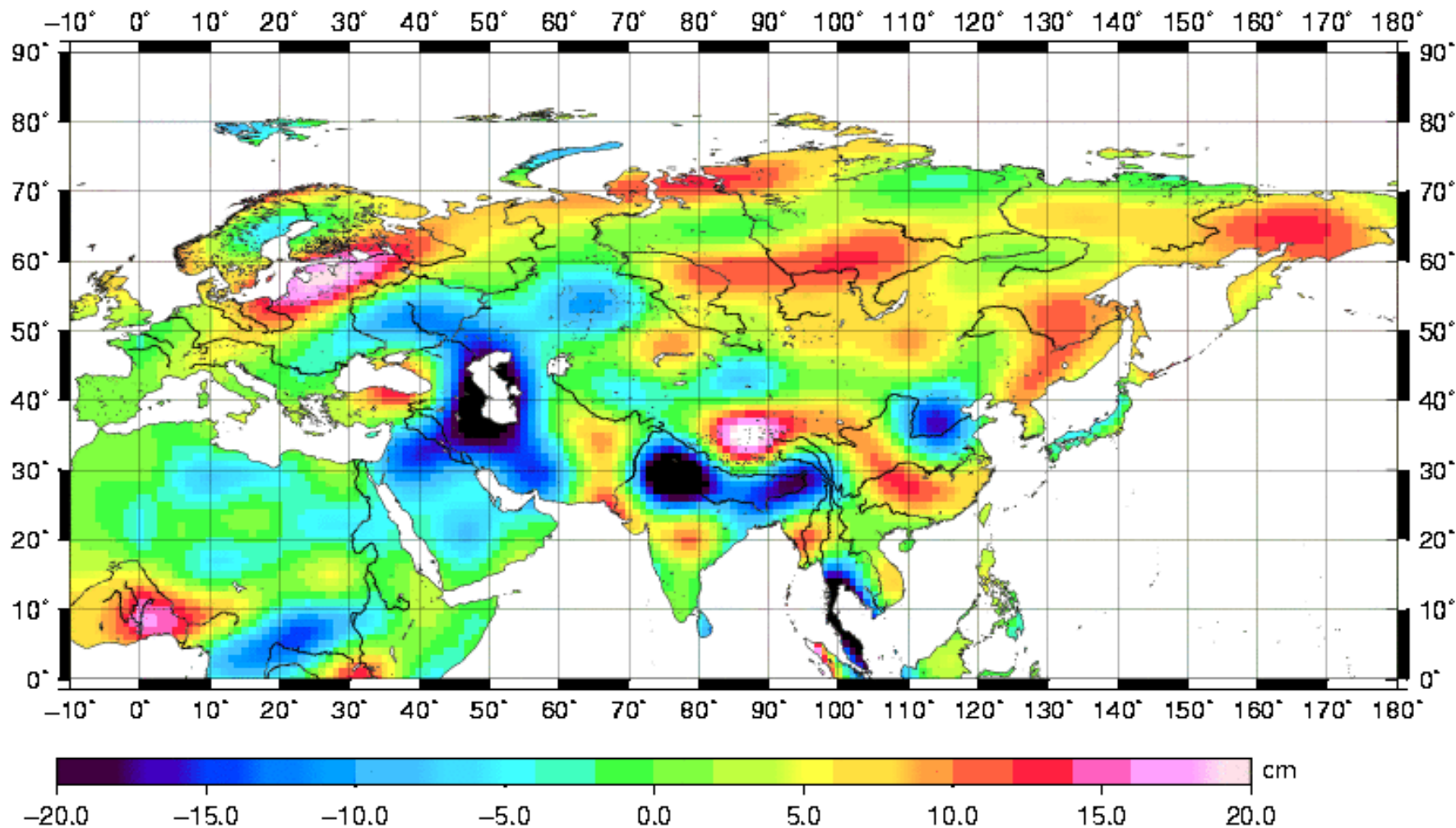


Снимки ледника Baltoro со спутников
Landsat 5 and 7 с 1991 по 2002 гг.



earth
observatory

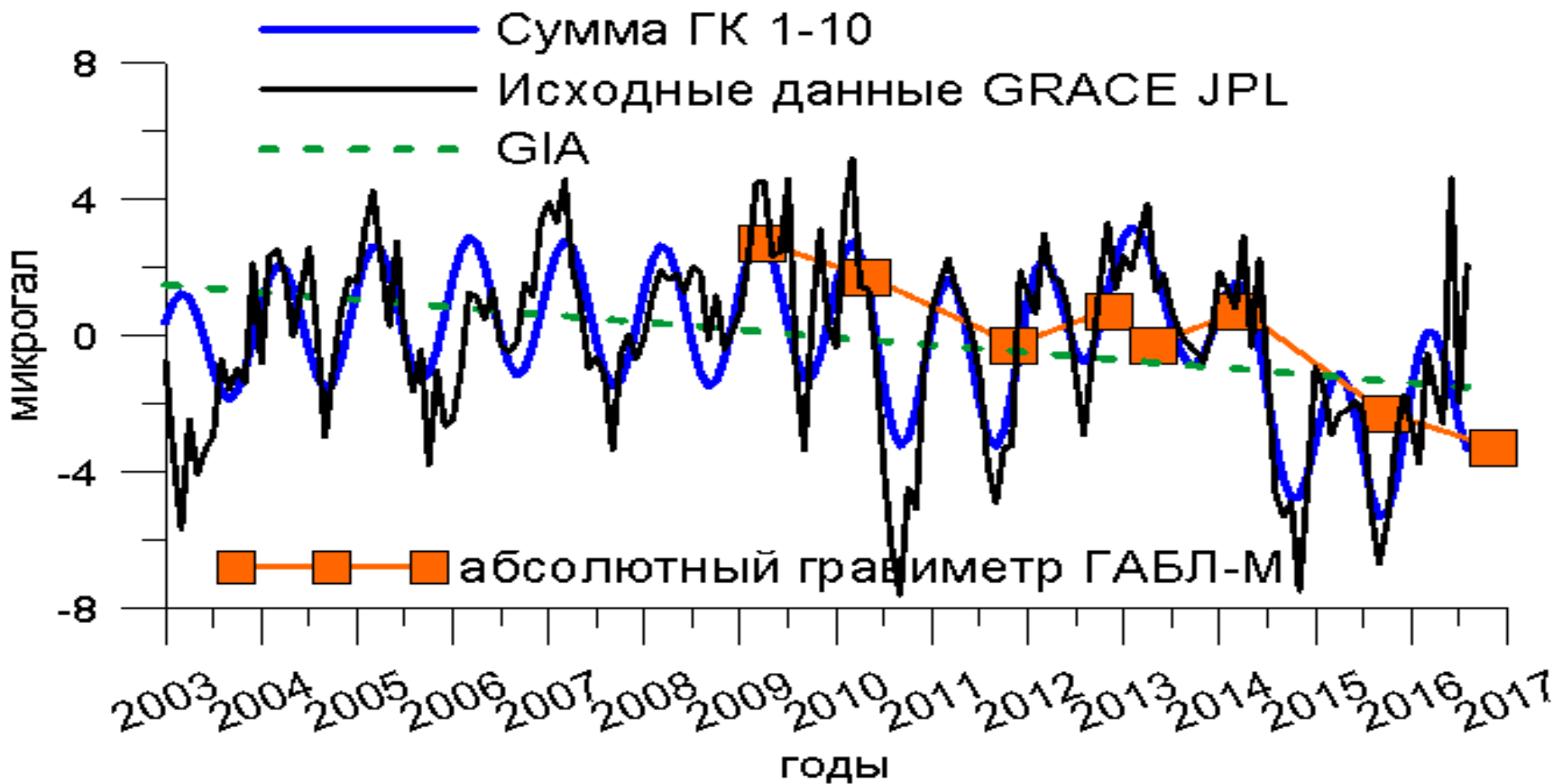
Тренды в изменении масс с 2003 по 2016 г. над Россией по данным GRACE



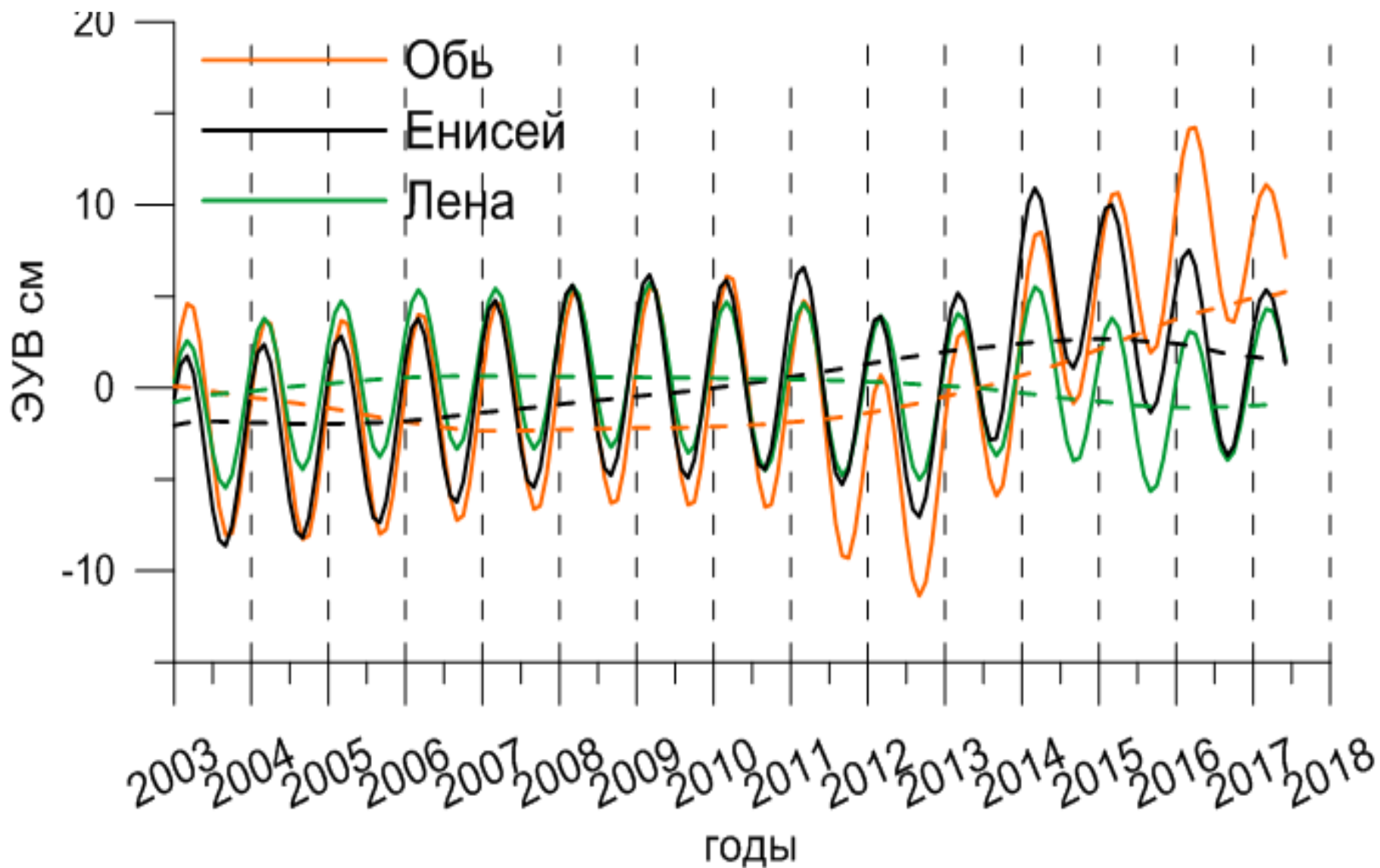
Сравнение данных GRACE с данными абсолютной гравиметрии

Данные абсолютных гравиметров предоставил Виктор Юшкин
Главный гравиметрический пункт СССР

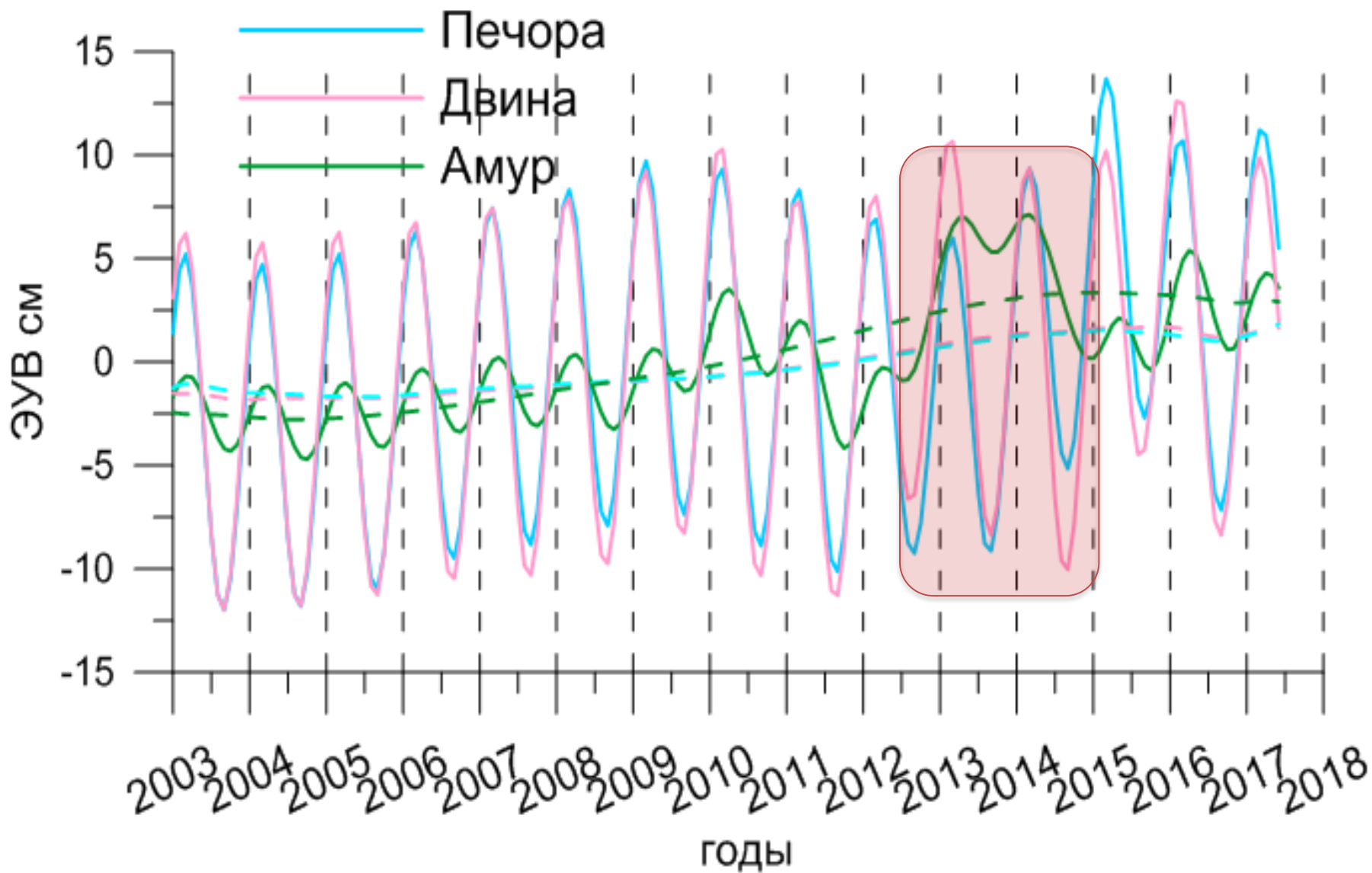
Москва, Красная пресня, lon=37, lat=56



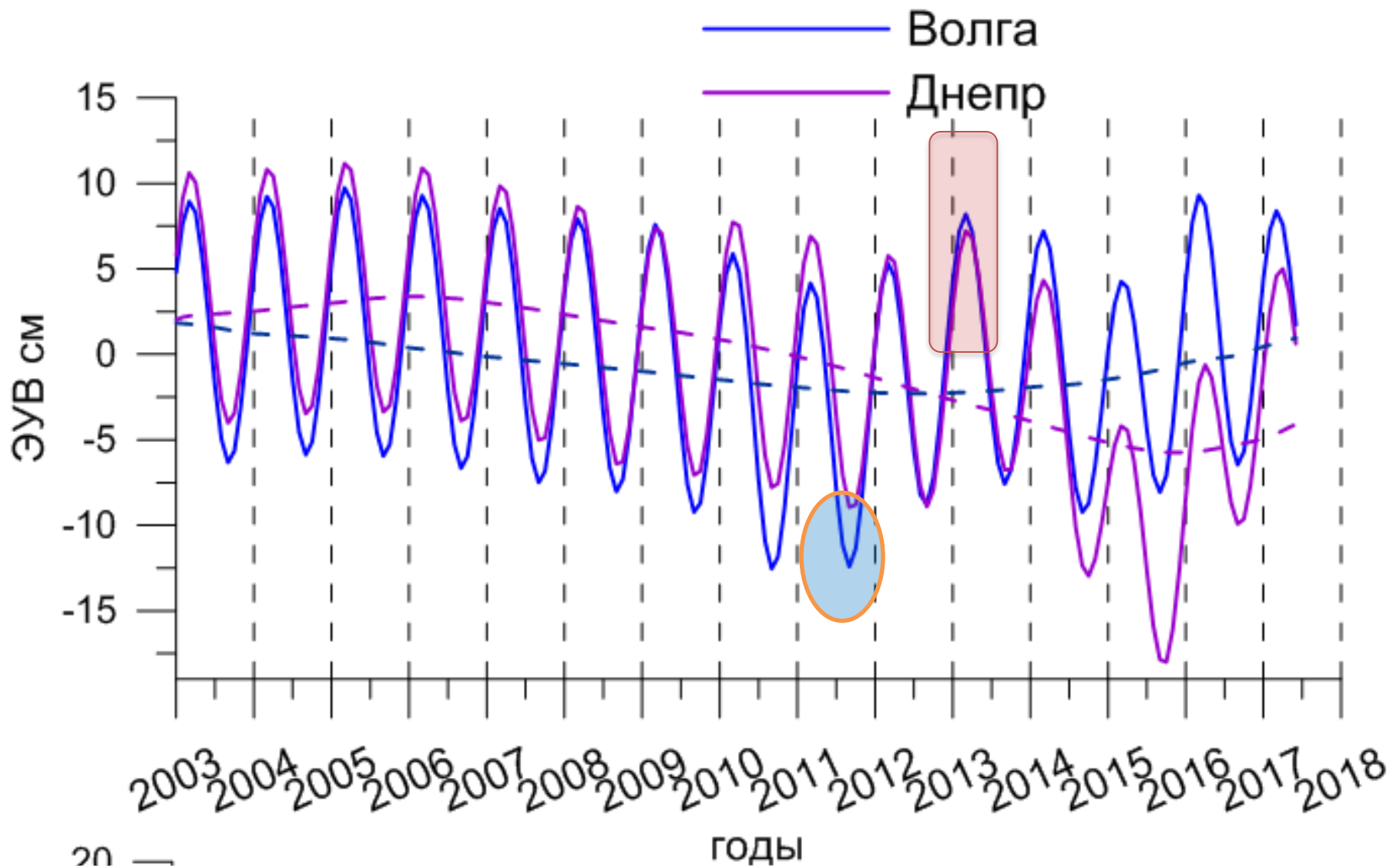
Изменения в бассейнах рек Сибири



Изменения масс на Амуре и реках севера



Изменения в бассейнах рек Европейской части





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



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



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

ISSN 0032-374X
ПРИРОДА
5 16

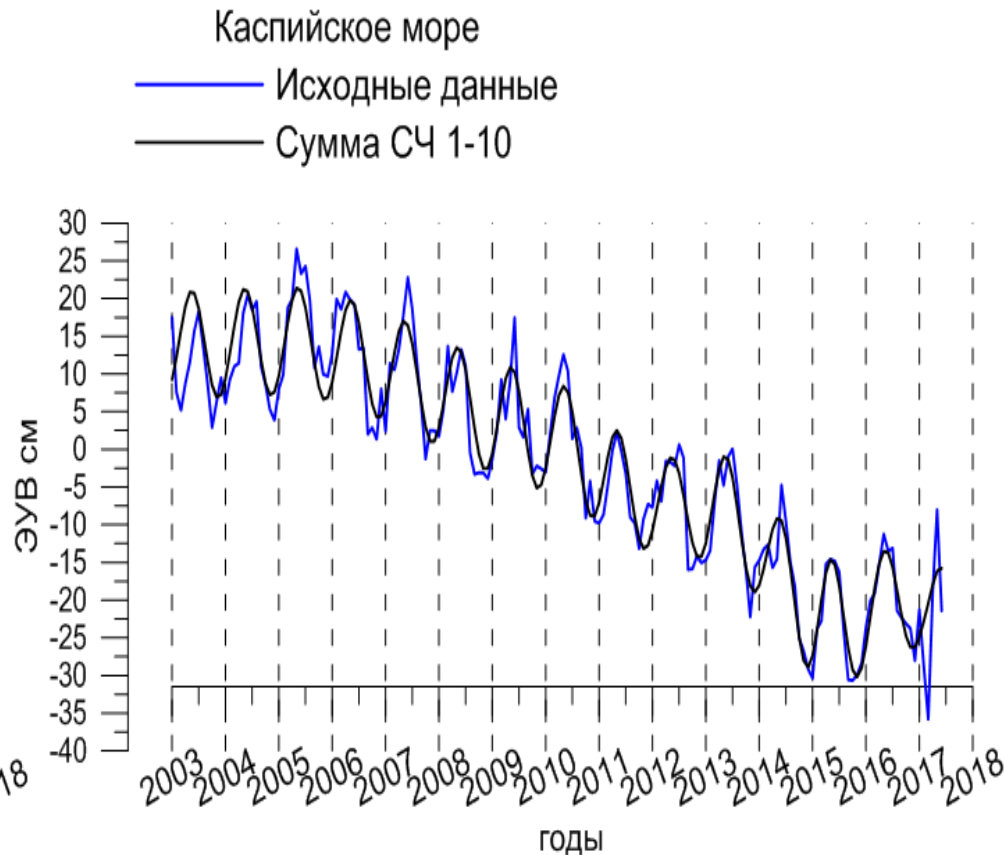
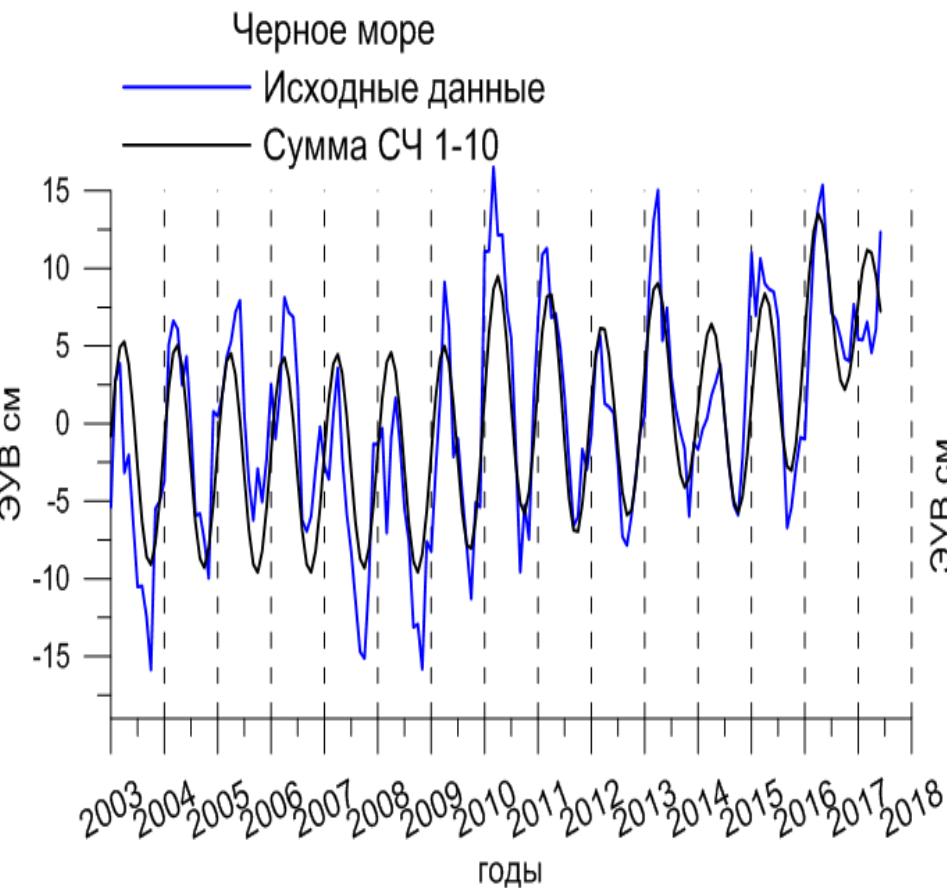


3 Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Шам С.К.

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.

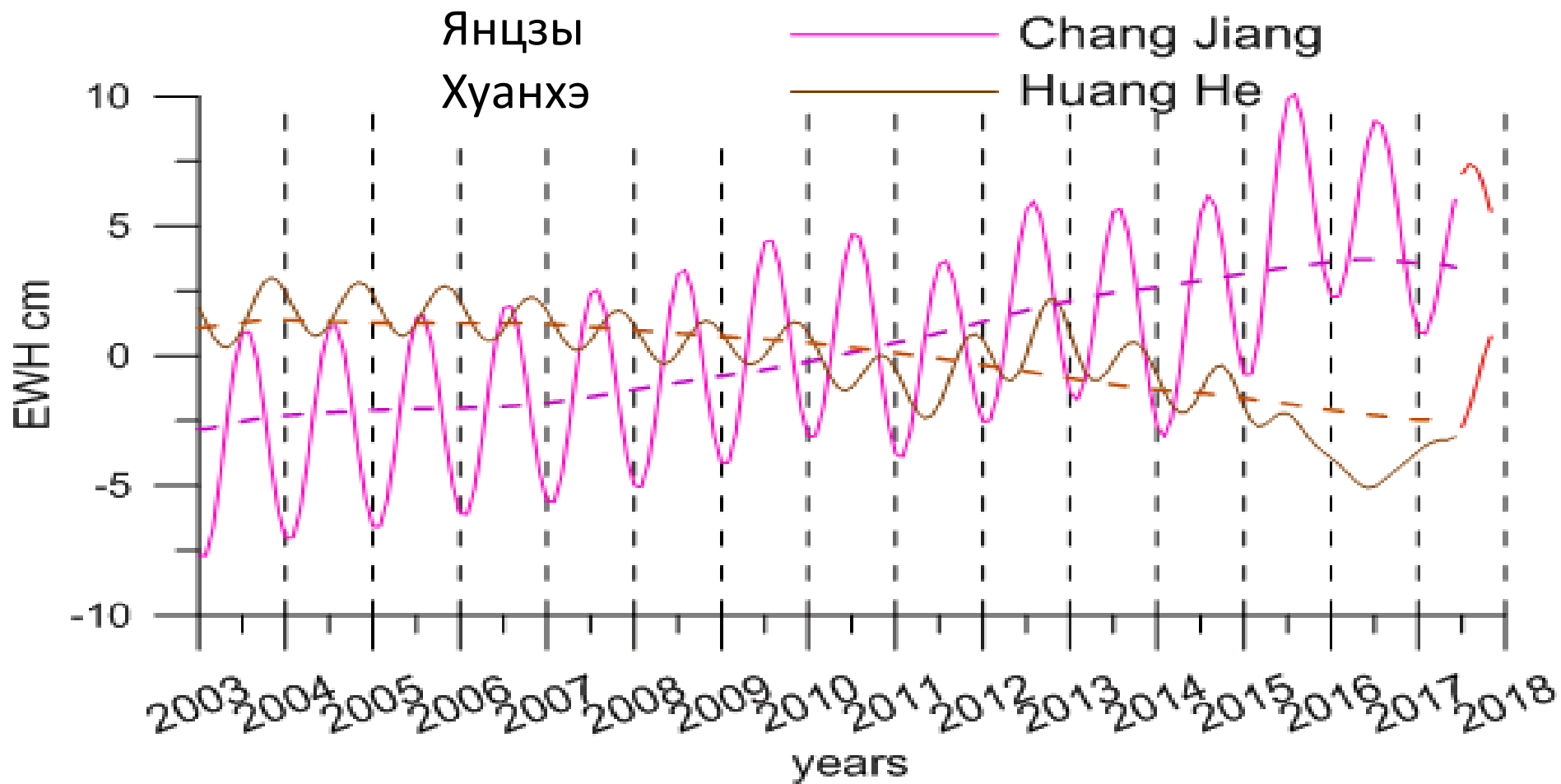
Изменения придонного давления и уровней Черного и Каспийского морей по альтиметрии и GRACE



Sea level since 1993 till 2011, filtered by MSSA

L. Zotov, V. Vlasova, Variations of the ocean bottom pressure from GRACE satellites
proceedings of Complex study of Russian seas conference , Sevastopol, Russia, April 2016.

Изменения масс в бассейнах главных рек Китая





р. Янцзы 2015



Отпечатки землетрясений в данных GRACE

Gravitational gradient changes following the 2004 December 26 Sumatra–Andaman Earthquake inferred from GRACE

Lei Wang,* C. K. Shum and Christopher Jekeli

Division of Geodetic Science, School of Earth Sciences, Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA. E-mail: leiwang@ldeo.columbia.edu

Accepted 2012 September 6. Received 2012 September 6; in original form 2012 January 17

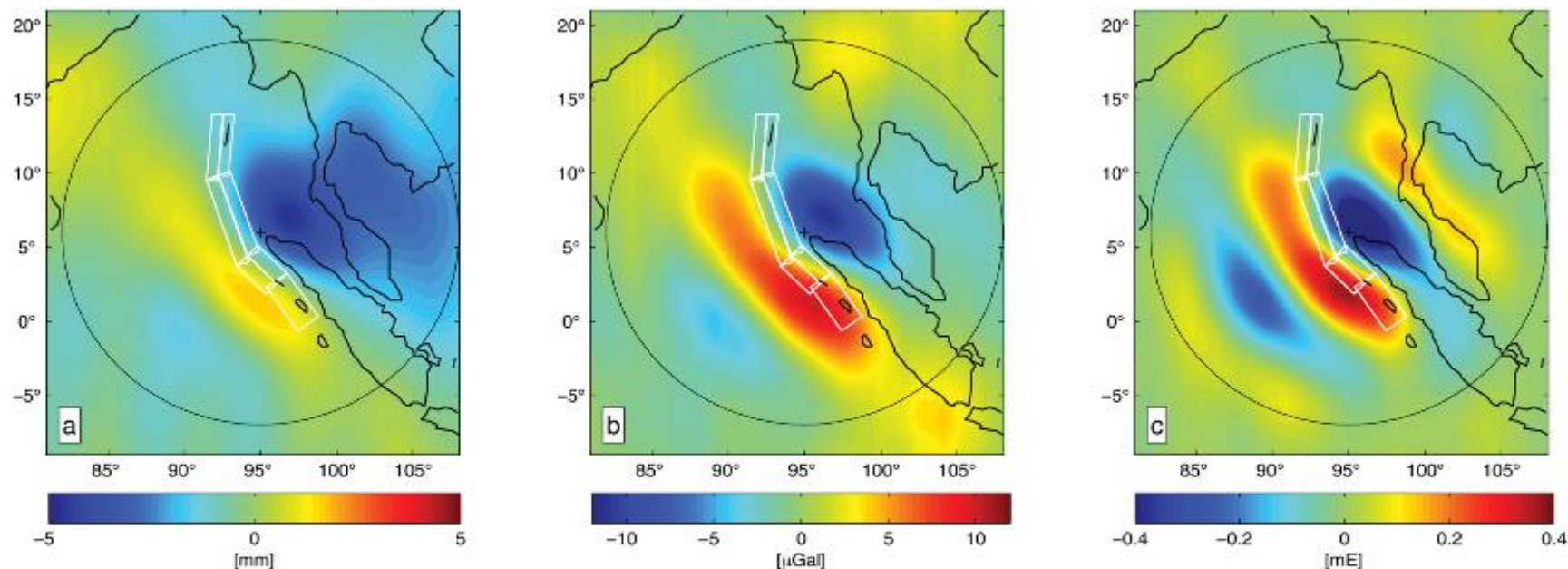


Figure 5. Comparison between GRACE-derived (a) geoid height change, (b) gravity change and (c) gravitational gradient change caused by 2004 Sumatra and 2005 Nias events. The black circle shows the spherical cap used to construct the Slepian tapers (Wieczorek & Simons 2005), which are used in the localized spectrum estimation.

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ НАД СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫМ СЕКТОРОМ ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ МИССИИ ГРЕЙС

2.2019 Геофизика

И.В. Лыгин¹, Н.С. Ткаченко¹, Л.В. Зотов^{1,2}

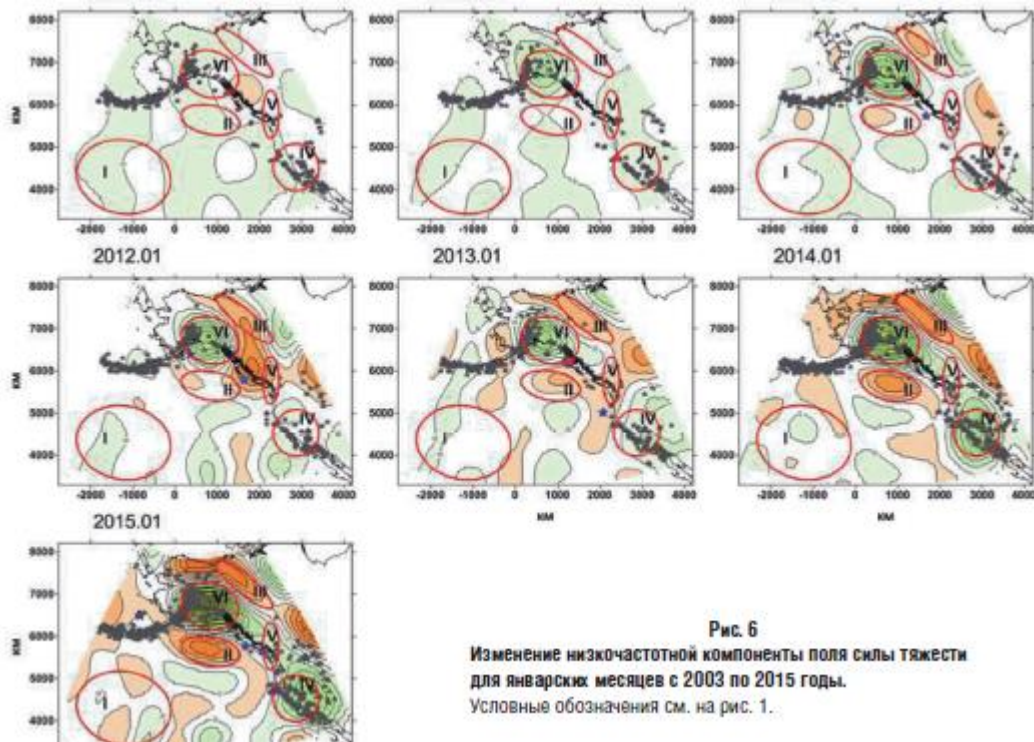


Рис. 6
Изменение низкочастотной компоненты поля силы тяжести
для январских месяцев с 2003 по 2015 годы.
Условные обозначения см. на рис. 1.



ЛЫГИН

Иван Владимирович

Доцент, кандидат геолого-минералогических наук, Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры.



ТКАЧЕНКО

Наталья Сергеевна

Аспирант, Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры.

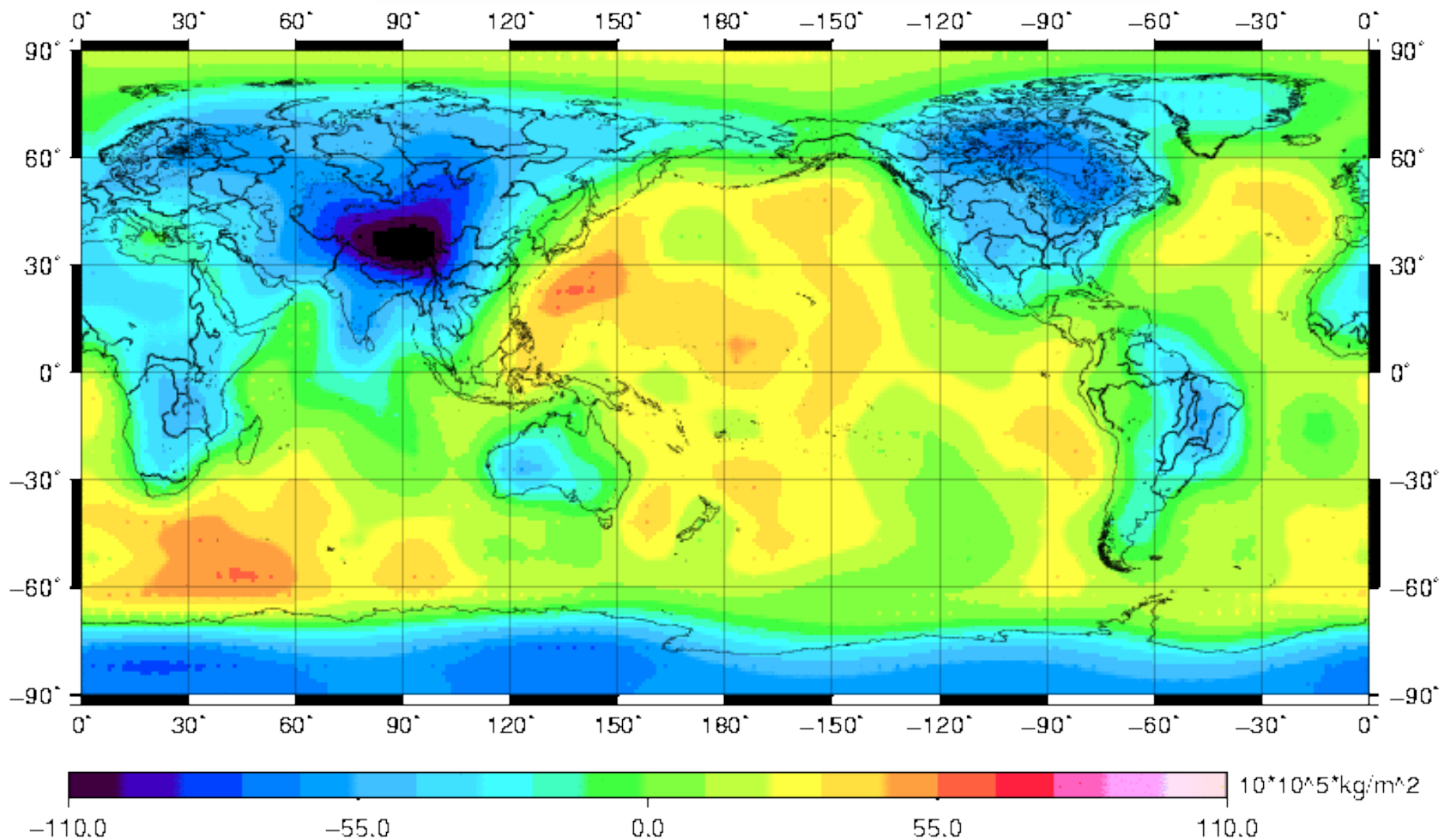


ЗОТОВ

Леонид Валентинович

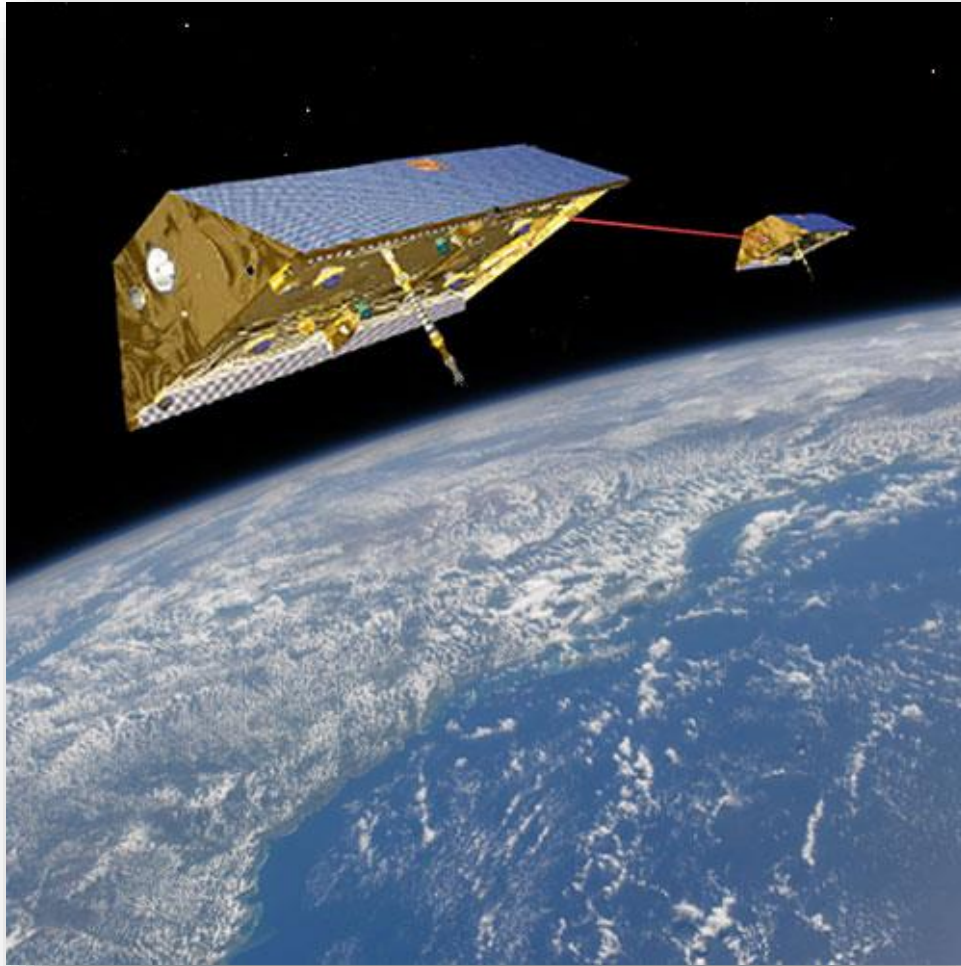
Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, лаборатория гравиметрии.

Напряжения в литосфере на средней глубине 23 км вычисленные по данным гравиметрии и топографии

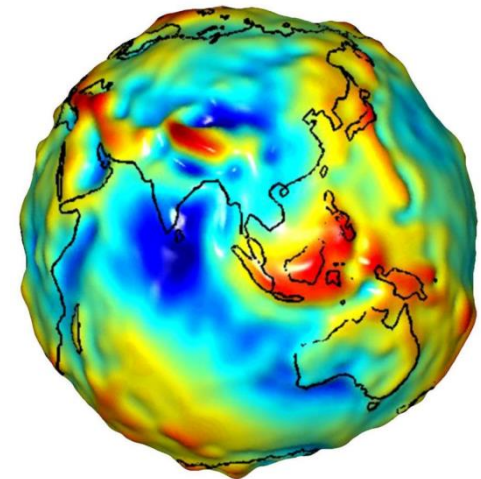


Из статьи Чуйковой, Максимовой, Насоновой

Как померить массу океана?



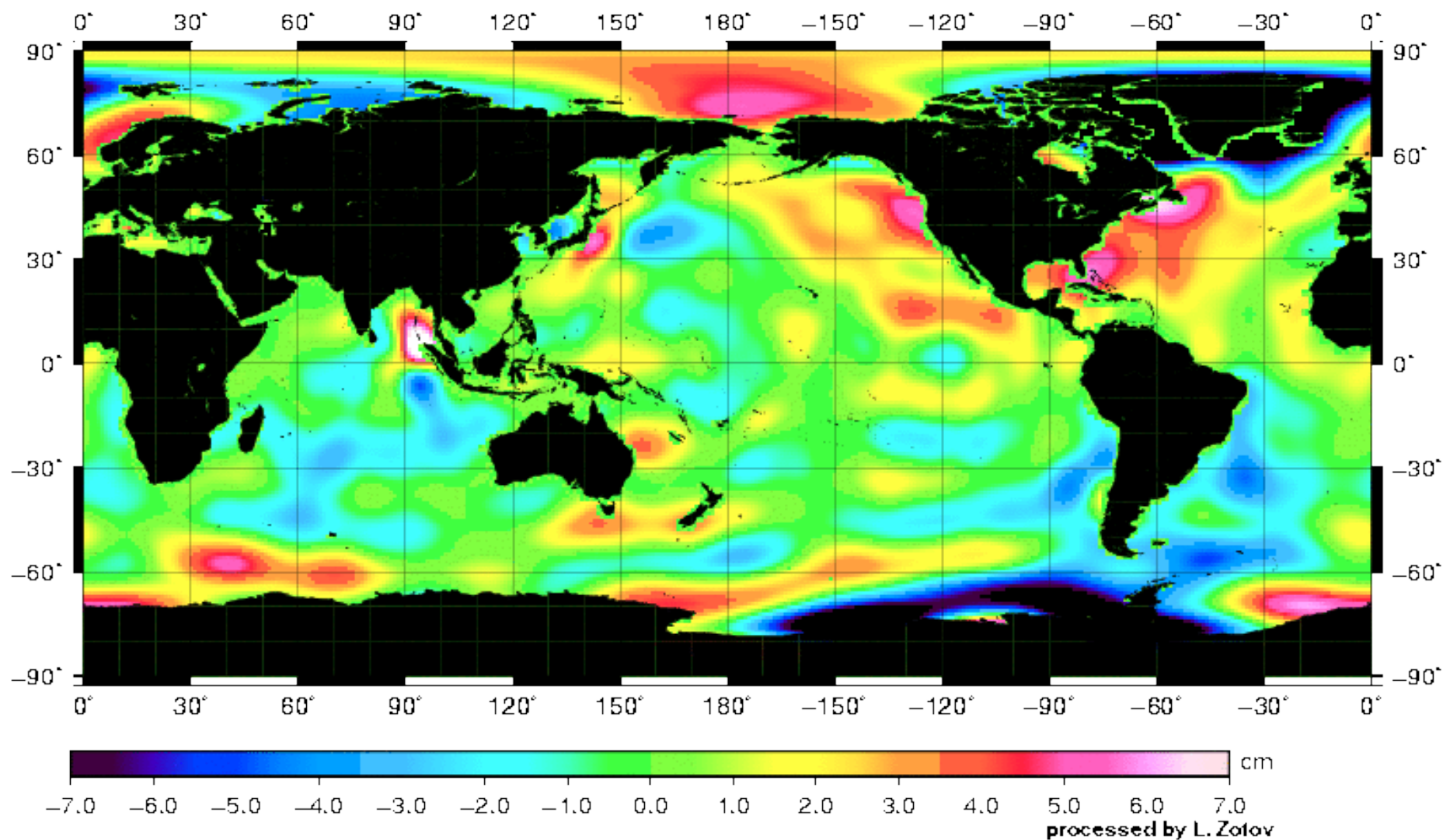
Спутники-близнецы GRACE
Gravity Recovery And Climate Experiment



Визуализация гравитационной модели Земли по данным GRACE

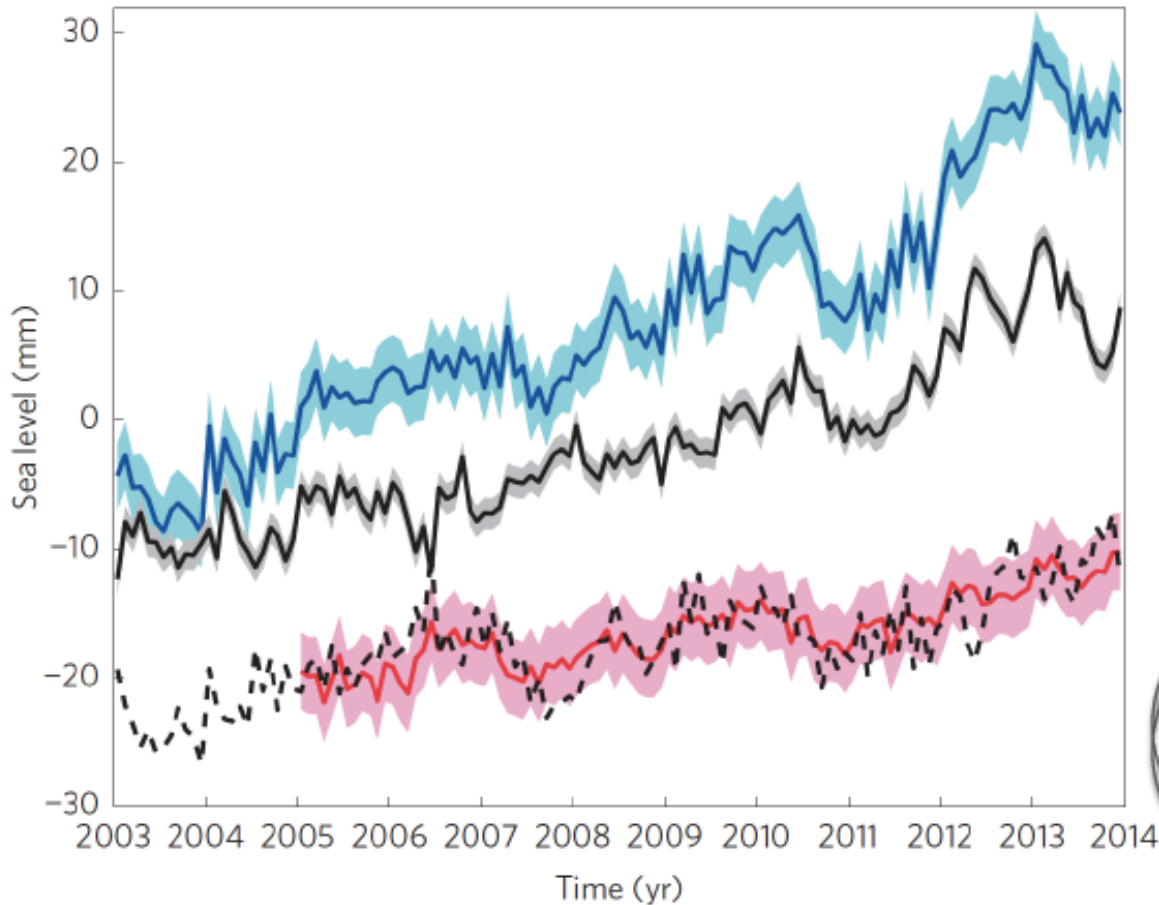
Тренды придонного давления по данным GRACE Ocean Bottom Pressure (PC 1), Don Chambers data

PC 1 2003-2015



Global mean sea level change (2005-2013): The budget

Изменения уровня моря = стерическая + массовая компонента



Observed GMSL
 2.78 ± 0.32 mm/yr
(altimeters)



Ocean mass:
 2.0 ± 0.11 mm/yr
(GRACE)



0.77 ± 0.28 mm/yr
(inferred warming
Alti. - GRACE: 0-bottom)

Thermal expansion
 0.9 ± 0.15 mm/yr
(Argo: 0-2000m)

So what about the deep
ocean contribution
(<2000m) ?

Note: uncertainty here just simple fit-uncertainty

W. Llovel, J.K. Willis, F.W. Landerer and I. Fukumori

SPACE SCIENCES SERIES OF ISSI

Remote Sensing and Water Resources



A. Cazenave · N. Champollion · J. Benveniste
J. Chen *Editors*

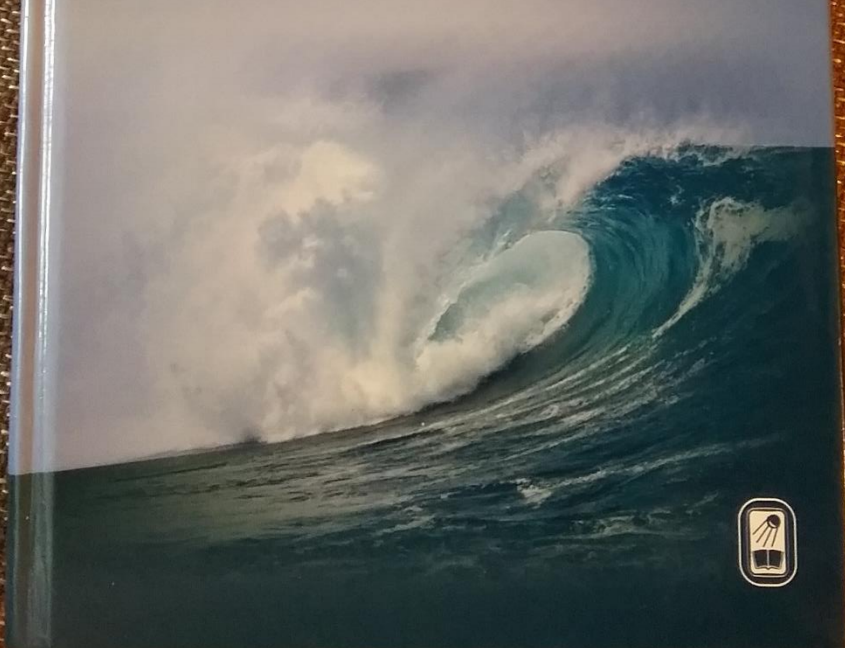
 Springer

 VSE

Н.А. Дианский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ОКЕАНА

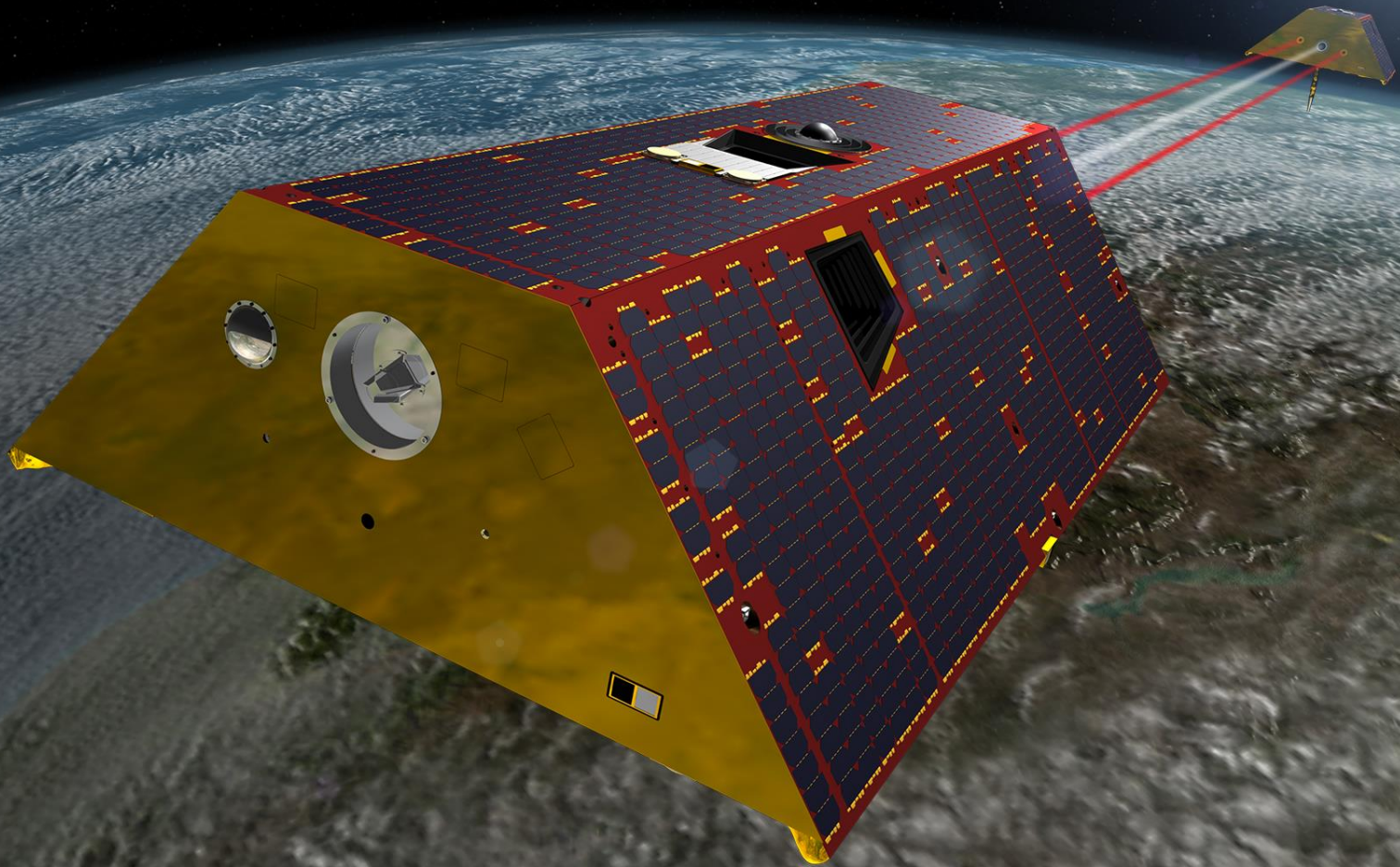
И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО РЕАКЦИИ
НА КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ И ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ
АТМОСФЕРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

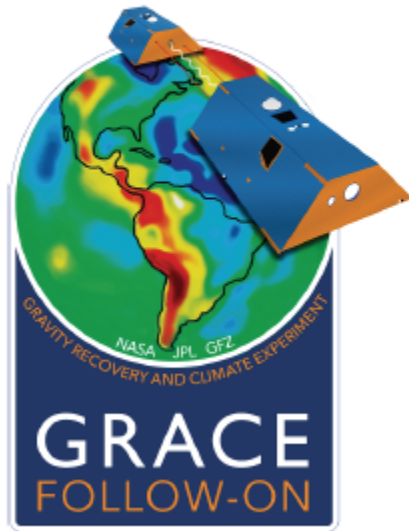




The NASA/German Research Centre for Geosciences GRACE Follow-On spacecraft launch onboard a SpaceX Falcon 9 rocket, Tuesday, May 22, 2018, from Space Launch Complex 4E at Vandenberg Air Force Base in California. The mission will measure changes in how mass is redistributed within and among Earth's atmosphere, 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

GRACE Follow-on запущены 21 мая 2018 г





GRACE Follow-On

Science Data System Newsletter Report: September 2019 (No. 7)

Contact: gracefo@jpl.nasa.gov

Felix Landerer¹, Frank Flechtner², Himanshu Save³, Christoph Dahle², Frank Webb¹, Michael Watkins¹

¹Jet propulsion Laboratory / California Institute of Technology, Pasadena, CA

²GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

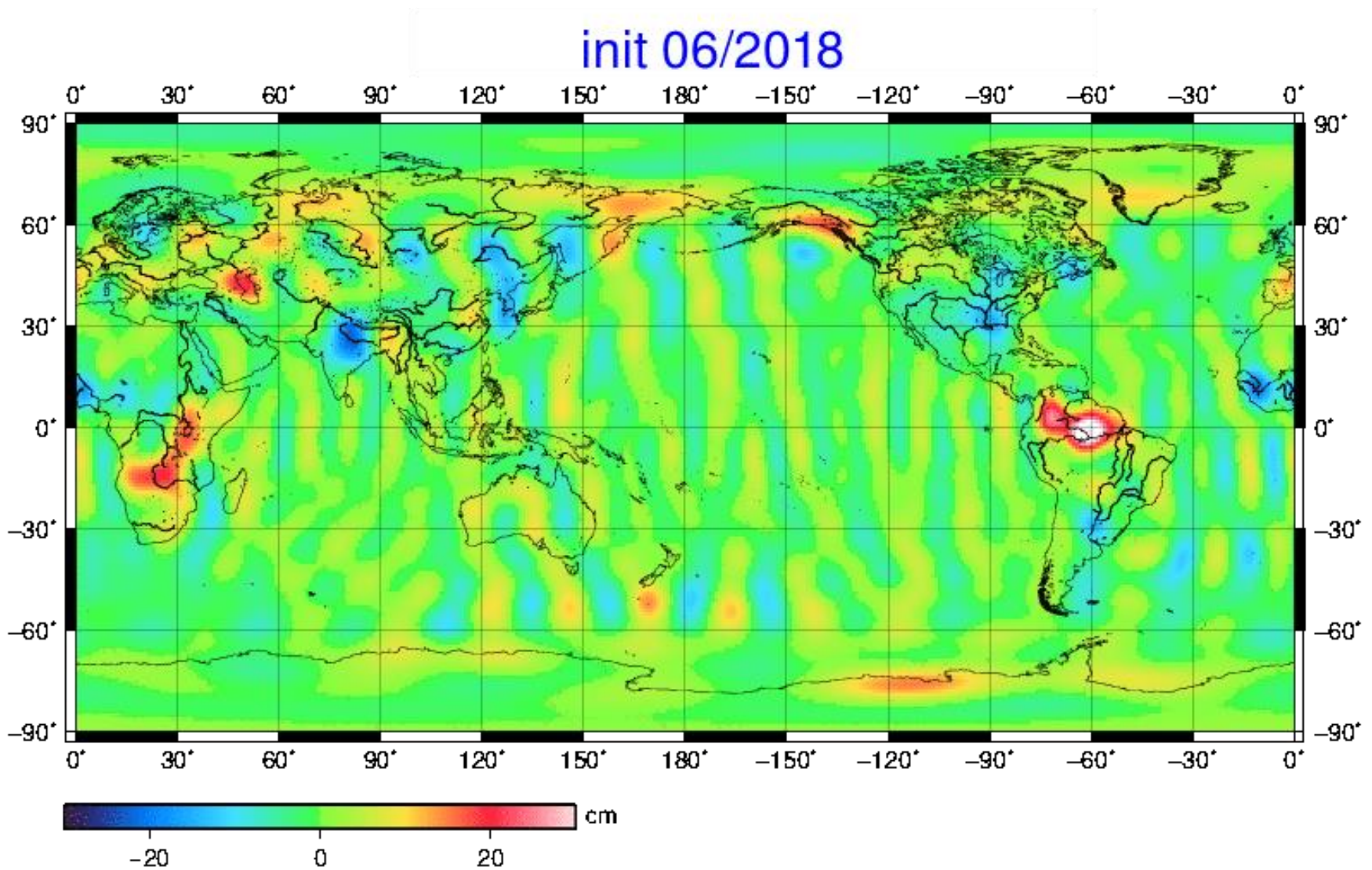
³Center for Space Research, University of Texas, Austin, TX

- **Mark your calendars:** the 2020 GRACE/GRACE-FO Science Team Meeting will take place at GFZ (Potsdam, Germany) from Oct 27-29, 2020.

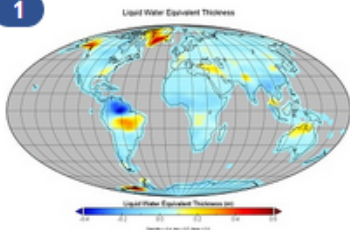
GRACE Follow-On Science Data System: News & Highlights

- **Level-2** SDS data products for **August-2019** are now available at NASA's Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) and GFZ's Information System and Data Center (ISDC).
- The GRACE / GRACE-FO Science Team Meeting took place from Oct. 8-10, 2019 at JPL/Caltech in Pasadena. Over 100 participants contributed 60 talks and 20 posters, discussing and evaluating the first year of GRACE-FO data, data continuity from GRACE, and new science results from both missions. An abstract booklet and proceedings will be available over the next few weeks.
- **Mark your calendars:** the 2020 GRACE/GRACE-FO Science Team Meeting will take place at GFZ (Potsdam, Germany) from Oct 27-29, 2020.

Исходные ежемесячные данные GRACE-FO Level 2



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

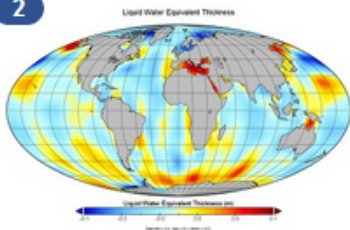
Processing Level: 3

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

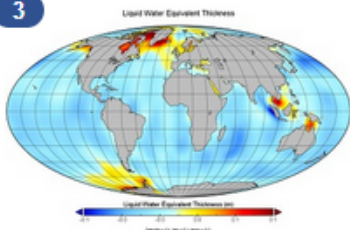
Processing Level: 3

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

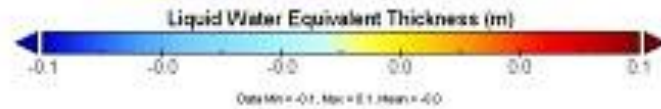
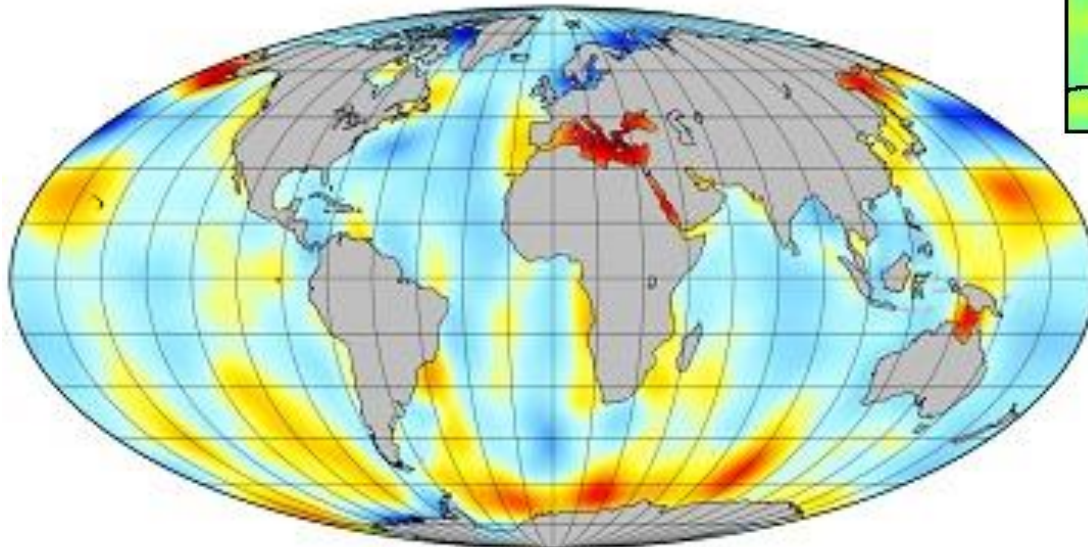
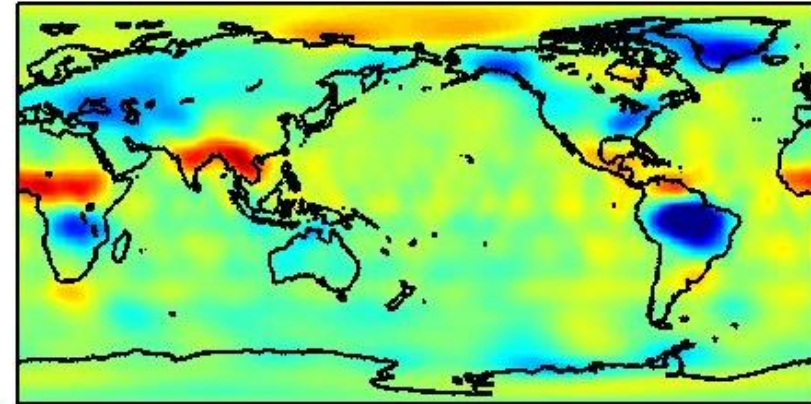
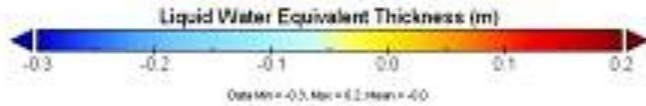
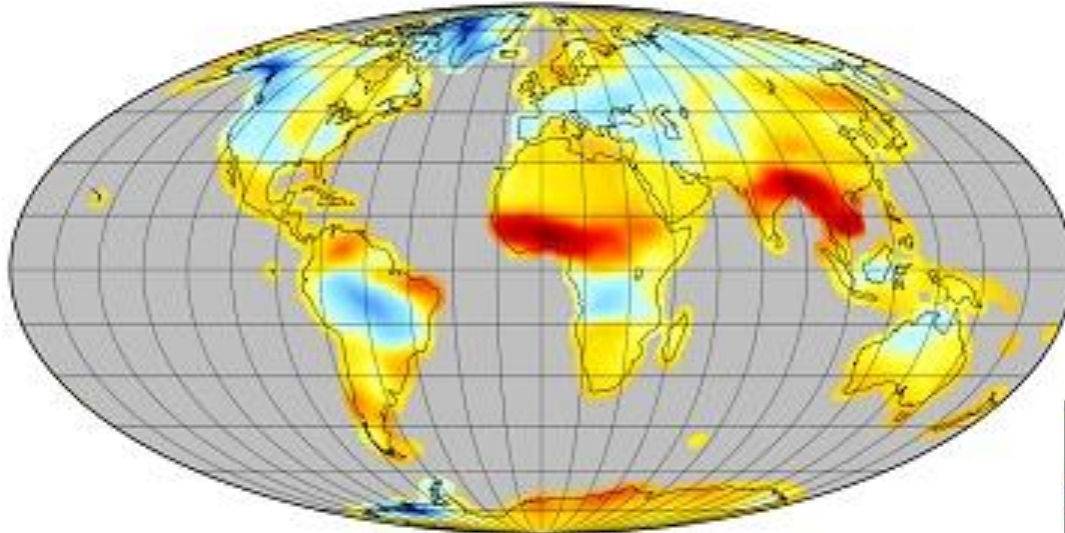
Longitude/Latitude Resolution: 1 degrees x 1 degrees

Start/End Date: 2018-May-22 to Present

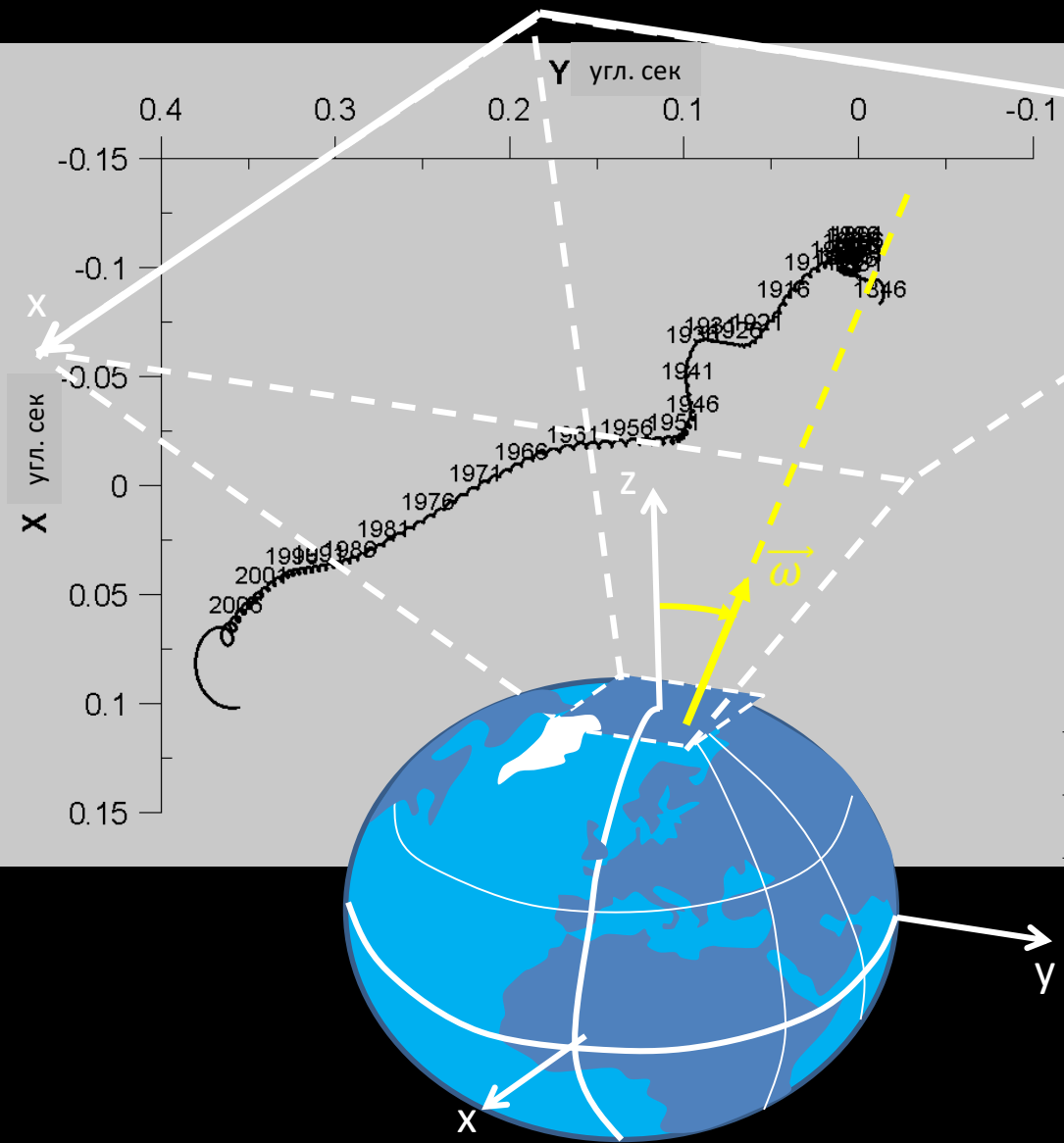
Description: The JPL monthly ocean bottom pressure grids are given as equivalent water thickness changes derived from GRACE-FO time-variable gravity observations during the specified timespan in ... [more](#)

Отфильтрованные данные Level 3 GRACE-FO

Liquid Water Equivalent Thickness

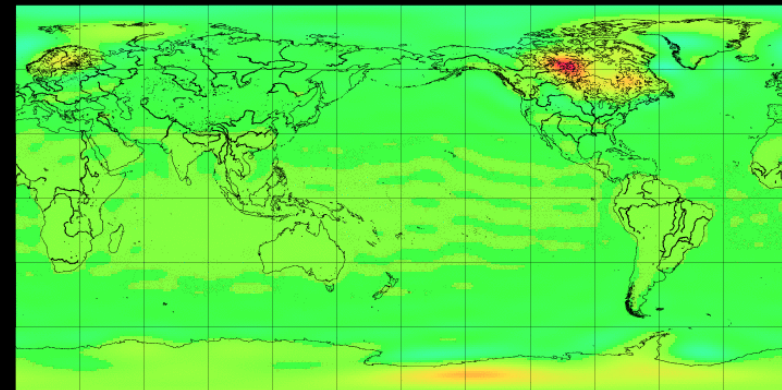


Тренд движения полюса и послеледниковое поднятие

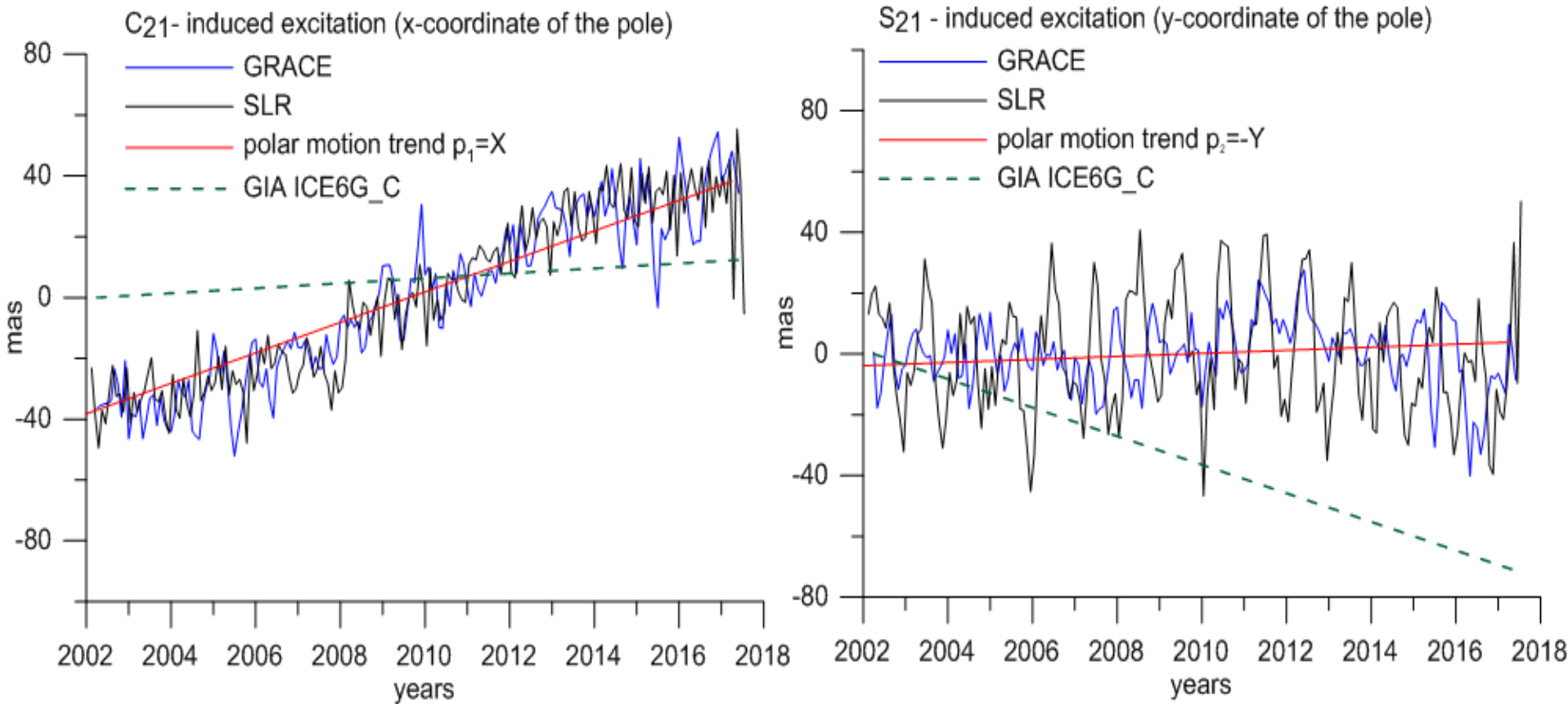


Послеледниковое поднятие
(Paulson et al. 2007)

GIA 8/0.tx



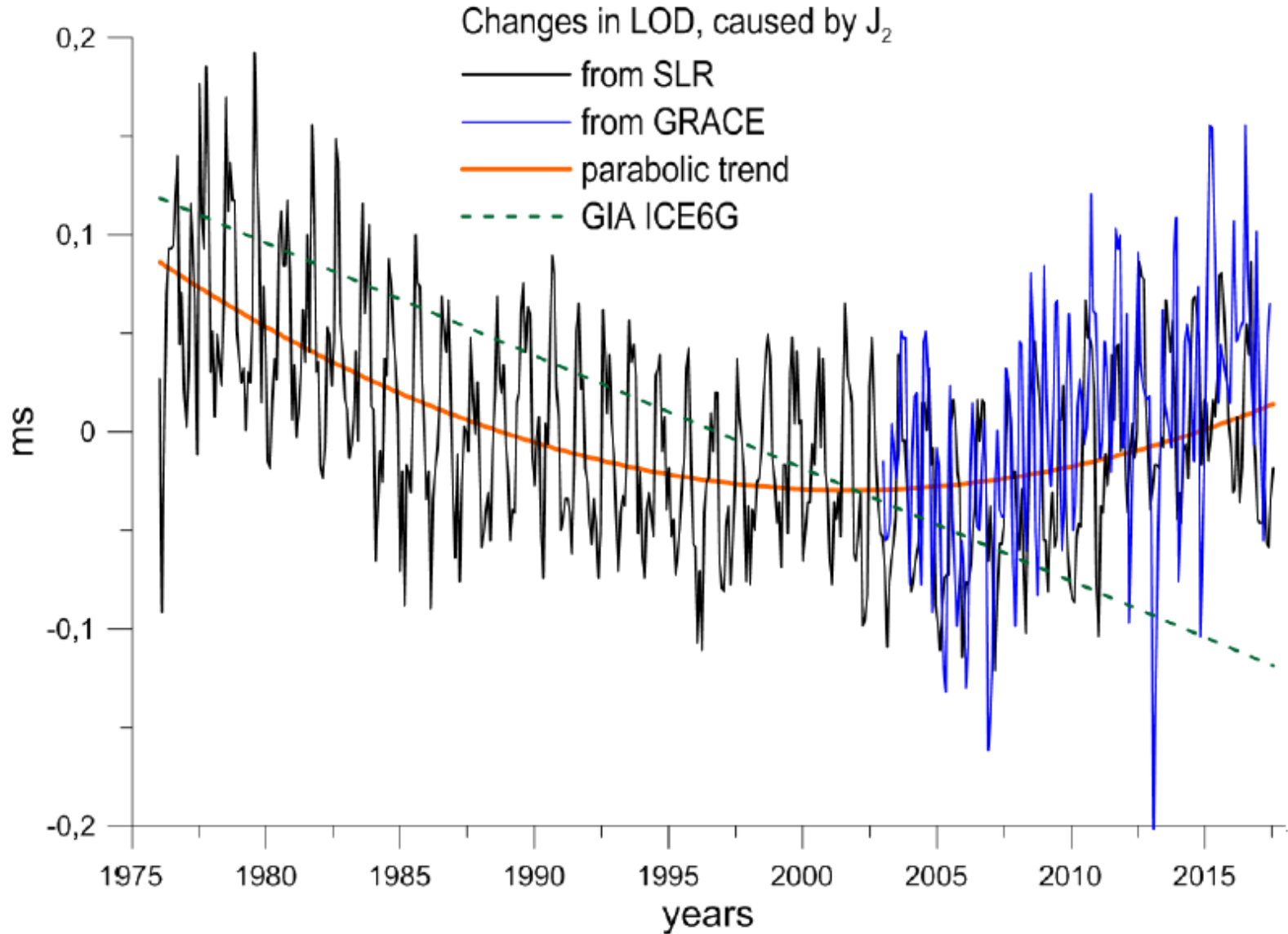
Согласие значений C_{21} S_{21} с дрейфом полюса



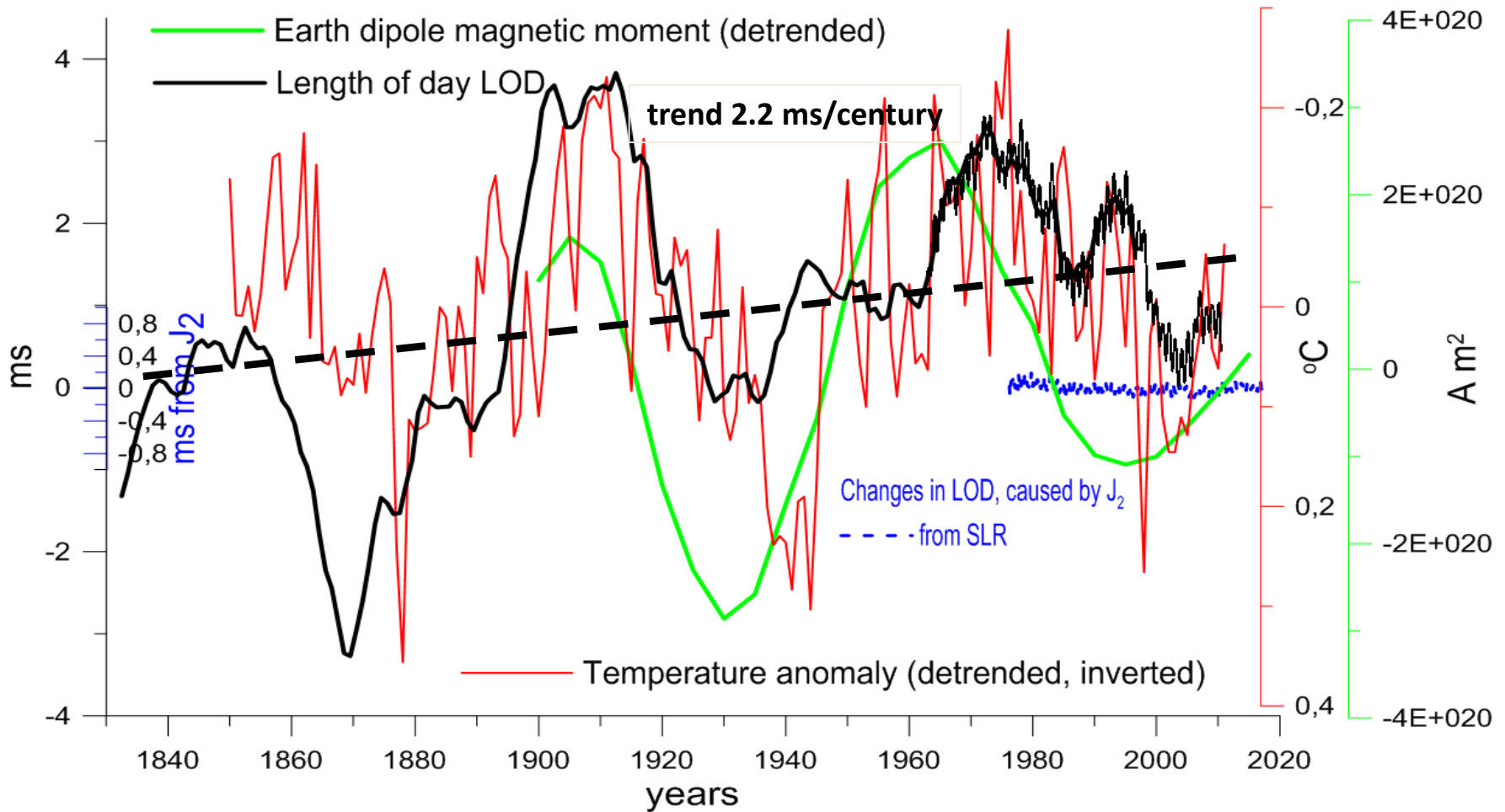
Comparison of GRACE and SLR C_{21} and S_{21} induced excitations with the polar motion trends. GIA model ICE6G_c is shown with dashed line.

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

Вариации J_2 по ЛЛС и GRACE и вклад в LOD



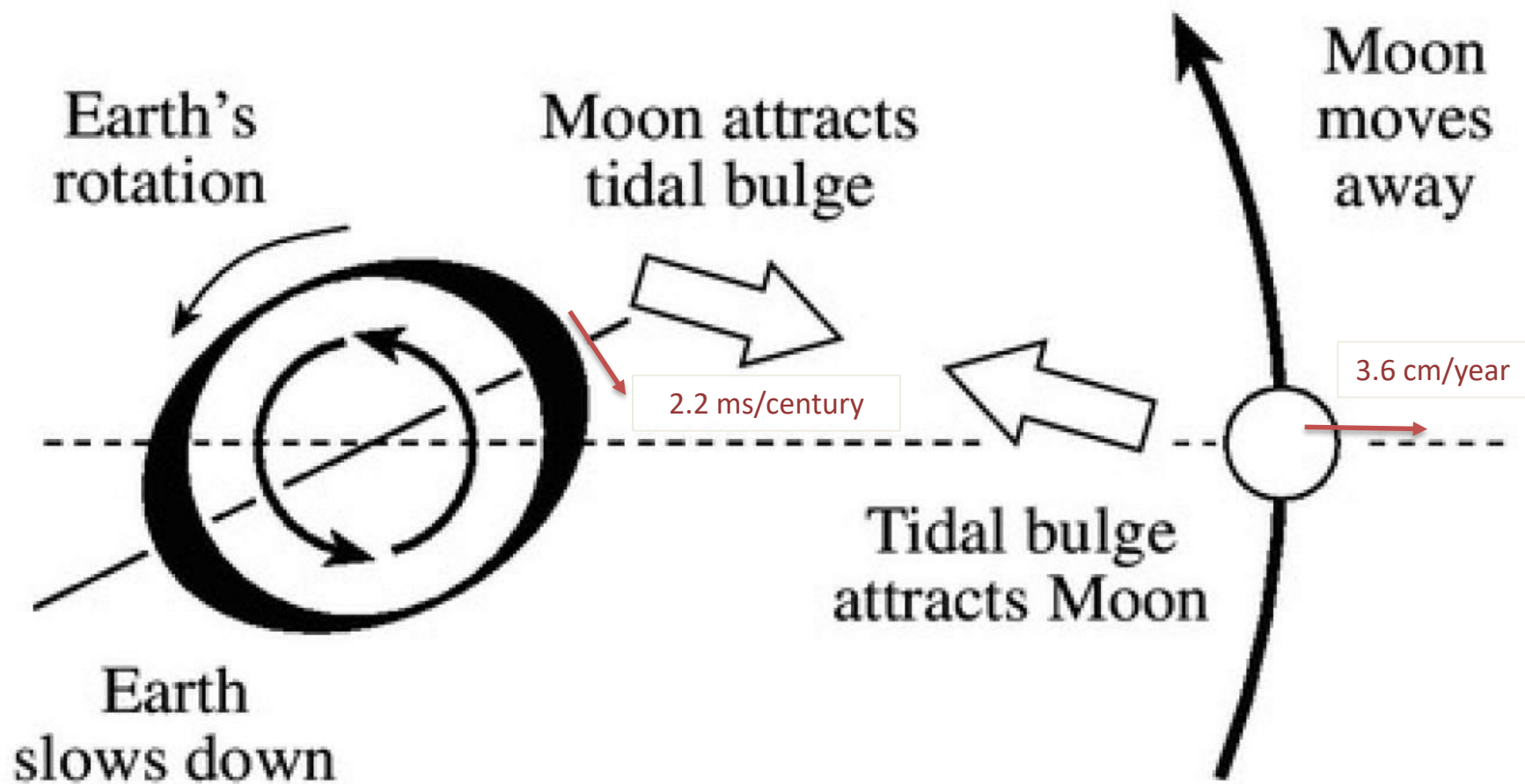
Долговременные изменения LOD и др. факторов



Earth dipole magnetic moment

$$m_d = \frac{4\pi}{\mu_0} a^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2},$$

Приливное замедление вращения Земли





**Гравитационное поле Земли
несет массу информации ученым**

MSSA of globally gridded OAM from ECCO, AAM from ECMWF, and gravity from GRACE

Publisher: IEEE

2 Author(s)

Leonid Zotov ; Elena Scheplova [View All Authors](#)

62
Full
Text Views



Abstract

Document Sections

- I. Introduction
- II. MSSA Methodology
- III. MSSA of AAM and OAM
- IV. MSSA of Grace Data
5. Conclusions

Authors

Figures

References

Keywords

Abstract:

Multichannel singular spectrum analysis (MSSA) is applied to the globally gridded oceanic angular momentum (OAM) data from ECCO (KF080) model, Atmospheric Angular Momentum from ECMWF model, and Earth gravity field from GRACE satellites. Principal components of the oceanic, atmospheric, and hydrological changes and their influence on the rotation of the Earth (polar motion PM and length of day LOD) are extracted. The regions where mass and motion terms make the largest input into PM excitation and LOD changes are identified. The trends, annual, and other global-scale modes are separated. Multichannel singular spectrum analysis is found to be a promising method for signal filtering and modes decomposition. Possible connections between climate change and Earth rotation are discussed.

Published in: 2016 Third International Conference on Digital Information Processing, Data Mining, and Wireless Communications (DIPDMWC)

Date of Conference: 6-8 July 2016

INSPEC Accession Number: 16196580

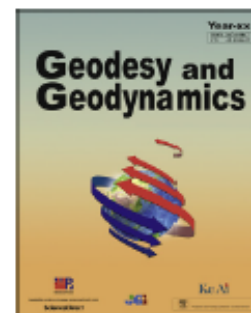
Date Added to IEEE Xplore: 04 August 2016

DOI: 10.1109/DIPDMWC.2016.7529376

► **ISBN Information:**

Publisher: IEEE

Conference Location: Moscow, Russia



A possible interrelation between Earth rotation and climatic variability at decadal time-scale

Leonid Zotov^{a,b,*}, C. Bizouard^c, C.K. Shum^{d,e}

^a National Research University Higher School of Economics, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Moscow, Russia

^b Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

^c SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

^d Division of Geodetic Science, School of Earth Sciences, The Ohio State University, USA

^e State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, China

© Zotov Leonid Valentinovich

Study of the links between the Earth rotation and geophysical processes. – Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Russia, 2019. – 302 pages.

The work is devoted to the consideration of geophysical processes that cause the motion of the pole and changes in the length of the day. Particular attention is paid to the Chandler wobble. The method of its extraction and geodesic excitation reconstruction is developed. Atmospheric and oceanic excitation functions are investigated in the Chandler frequency band. Using the Earth's gravity field data from GRACE satellites, the first coefficients of the gravitational potential decomposition are analysed in terms of the effect of the corresponding mass redistribution on the Earth's rotation. The classical theory of rotation of the Earth with a liquid external and solid inner core is given. On its basis, the Euler-Liouville equations are generalized to the case of the triaxial Earth with oceans. The work also provides statistical analysis of the Earth rotation parameters predictions. The relationships of the Earth's rotation and climate processes are discussed.

Scientific advisers: Astronomer of the Paris observatory Christian Bizouard,
Doctor of Physics-Mathematics Nikolay Sidorenkov

© 列奥尼德·佐托夫

地球自转与地球物理过程的联系研究，俄罗斯联邦罗蒙诺索夫莫斯科国立大学斯特恩伯格天文研究所，2019，302页

这项研究致力于引起极移和日长变化的地球物理过程，尤其关注钱德勒晃动。提出了钱德勒晃动的提取和大地测量激发重建方法。在钱德勒频段研究了大气和海洋激发函数。利用GRACE卫星提供的地球重力场数据，根据质量分布对地球自转的影响，分析了相应的引力位系数。给出了含外核和内核的地球自转的经典理论。在此基础上，欧拉-刘维尔方程被拓展到适用于含海洋的三轴地球。研究也提供地球自转参数预测的统计分析。研究还讨论了地球自转与气候过程的关系。

科学顾问：科里斯汀尔·毕让德巴黎天文台天文学家，尼科莱·斯德仁科夫数学物理博士



ИСТИНА

Интеллектуальная Система Тематического Исследования Научно-метрических данных

[Главная](#) [Поиск](#) [Статистика](#) [О проекте](#) [Помощь](#)

Исследование связей между вращением Земли и геофизическими процессами диссертация

Научные консультанты: Кристиан Бизуар, Сидоренков Николай Сергеевич

Автор: Зотов Леонид Валентинович

Дата защиты: 24 октября 2019 года в 14:00

Шифр диссертационного совета: МГУ.01.02

Организация: МГУ имени М.В. Ломоносова

Область знаний: Физика и математика

Специальность: 01.03.01 - Астрометрия и небесная механика

Тип диссертации: Докторская

Организация, в которой выполнялась работа: МГУ имени М.В. Ломоносова

Оппоненты: Любушин Алексей Александрович, Бялко Алексей Владимирович, Яцкив Ярослав Степанович

Аннотация:

Работа посвящена рассмотрению геофизических процессов, вызывающих движение полюса и изменение длительности суток. Особенное внимание уделено чандлеровскому движению полюса. Разработана методика его выделения и восстановления геодезического возбуждения. Исследуются атмосферные и океанические возбуждающие функции в чандлеровском диапазоне. С использованием данных по гравитационному полю Земли со спутников GRACE анализируются первые коэффициенты разложения гравитационного потенциала в аспекте влияния соответствующего перераспределения масс на вращение Земли. Дана классическая теория вращения Земли с жидким внешним и твердым внутренним ядром, на её основе уравнения Эйлера-Лиувилля обобщены на случай трехосной Земли с океанами. В работе также проводится

[https://istina.msu.ru/
dissertations/211744667/](https://istina.msu.ru/dissertations/211744667/)