



МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СИНГУЛЯРНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ СО СПУТНИКОВ GRACE

Леонид Зотов^{1,2}, Наталья Фролова²

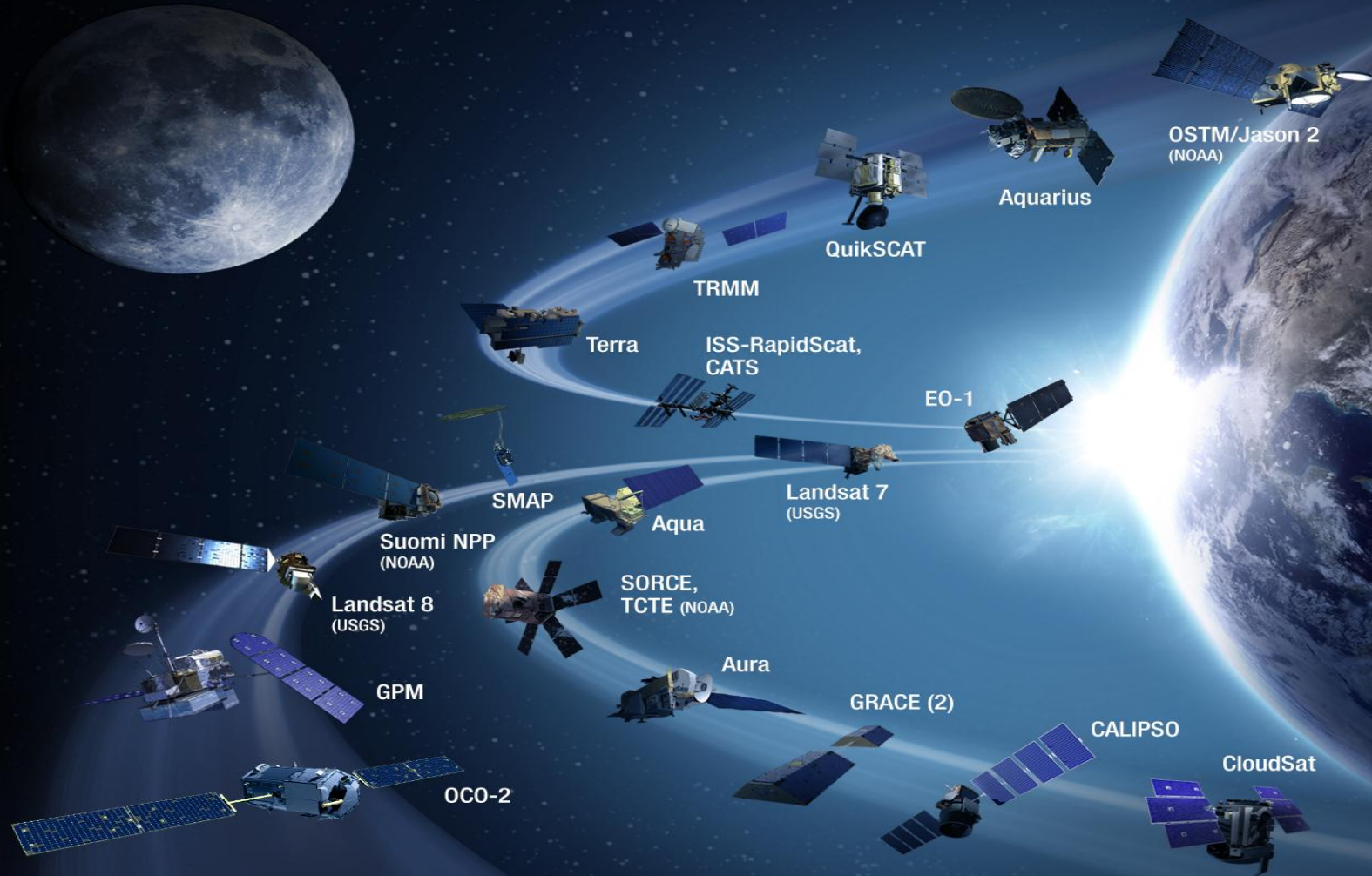
¹МИЭМ НИУ ВШЭ

²МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, Географический факультет



15 февраля 2017
ВНИФТРИ, Менделеево

NASA missions of remote sensing of the Earth



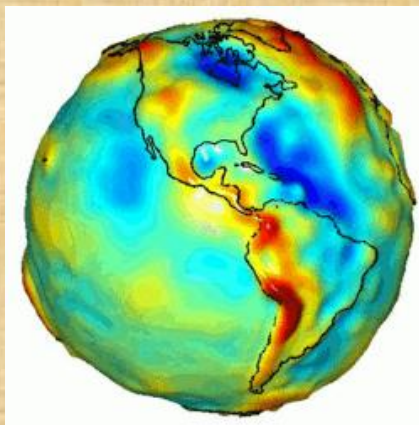
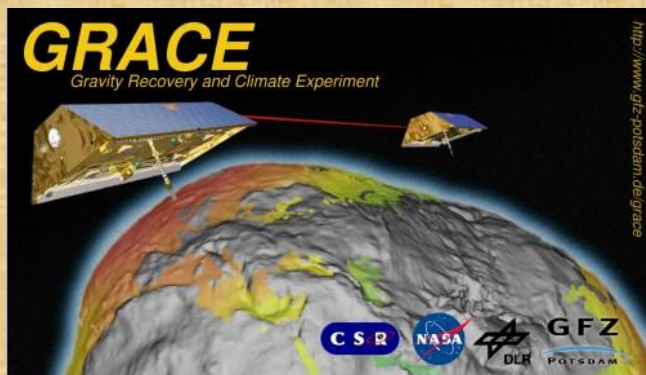
**Huge amount of data is available for the scientific community
(including hydrological)
Its analysis requires international collaboration**

Миссии по исследованию гравитационного поля

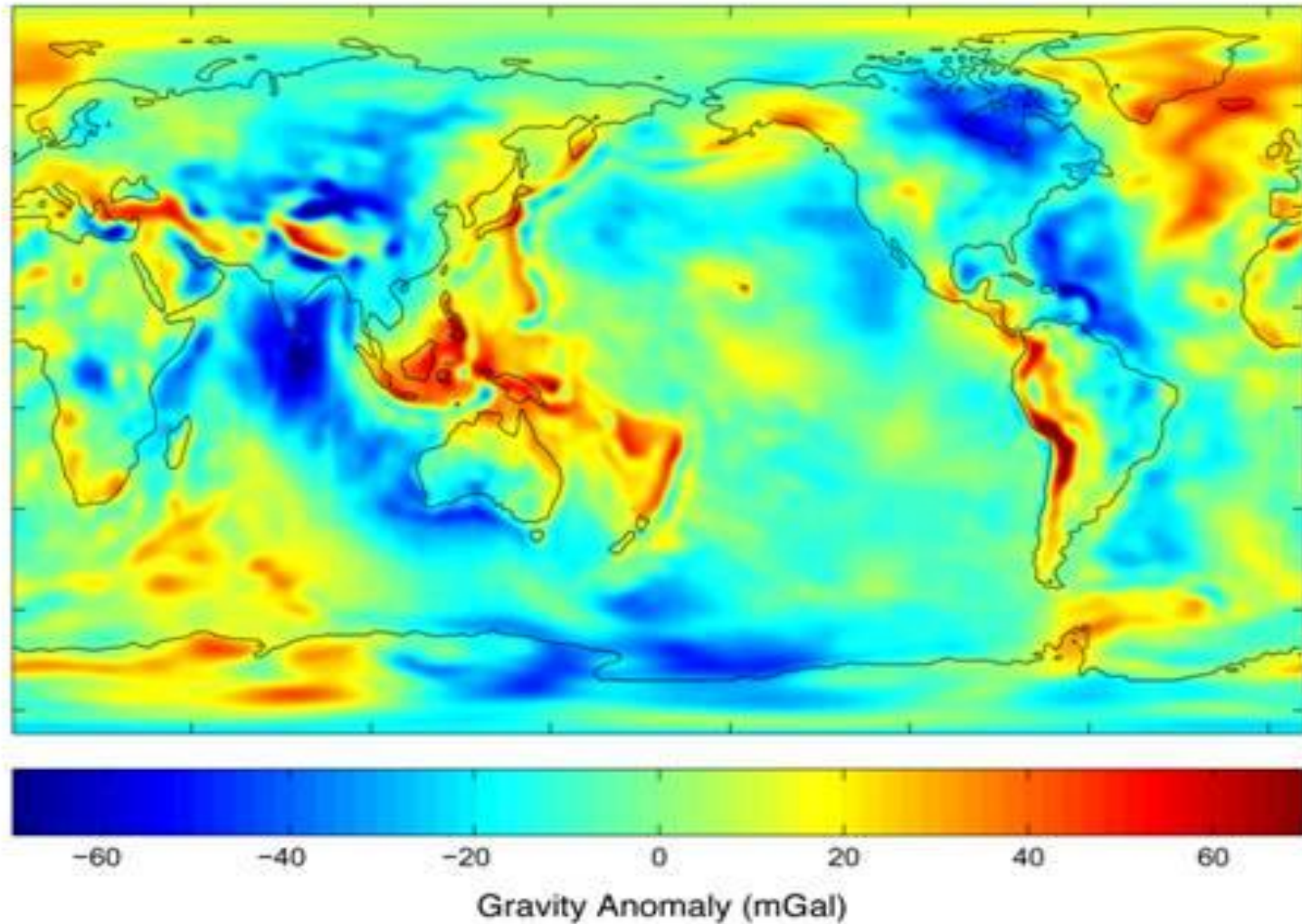
CHAMP - запущен GFZ в июле 2000 г. на орбиту высотой около 450 км. С целью изучения гравитационного и магнитного полей. Данные поступали 8 лет.

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 продлена до 2017 г. (при расчетном 2007).

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.



Гравитационное поле Земли по данным GRACE (GGM03s)



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

Предобработка данных GRACE

Использованы месячные файлы JPL Level-2 RL05 разложения по сферическим функциям с 01.2003 по 06.2016 – коэффициенты Стокса до 60 степени и порядка. Приливные и атмосферные эффекты исключены при обработке данных 1-го уровня.

16 файлов (06.03, 01.11, 06.11, 05.12, 10.12, 03.13, 08.13, 09.13, 02.14, 07.14, 12.14, 05.15, 06.15, 10.15, 11.15, 04.16) линейно проинтерполированы (всего $N=136$ файлов). Из-за проблем с аккумулятором данные некоторые из последних месяцев не поступают.

C_{20} коэффициенты заменены полученными из SLR.

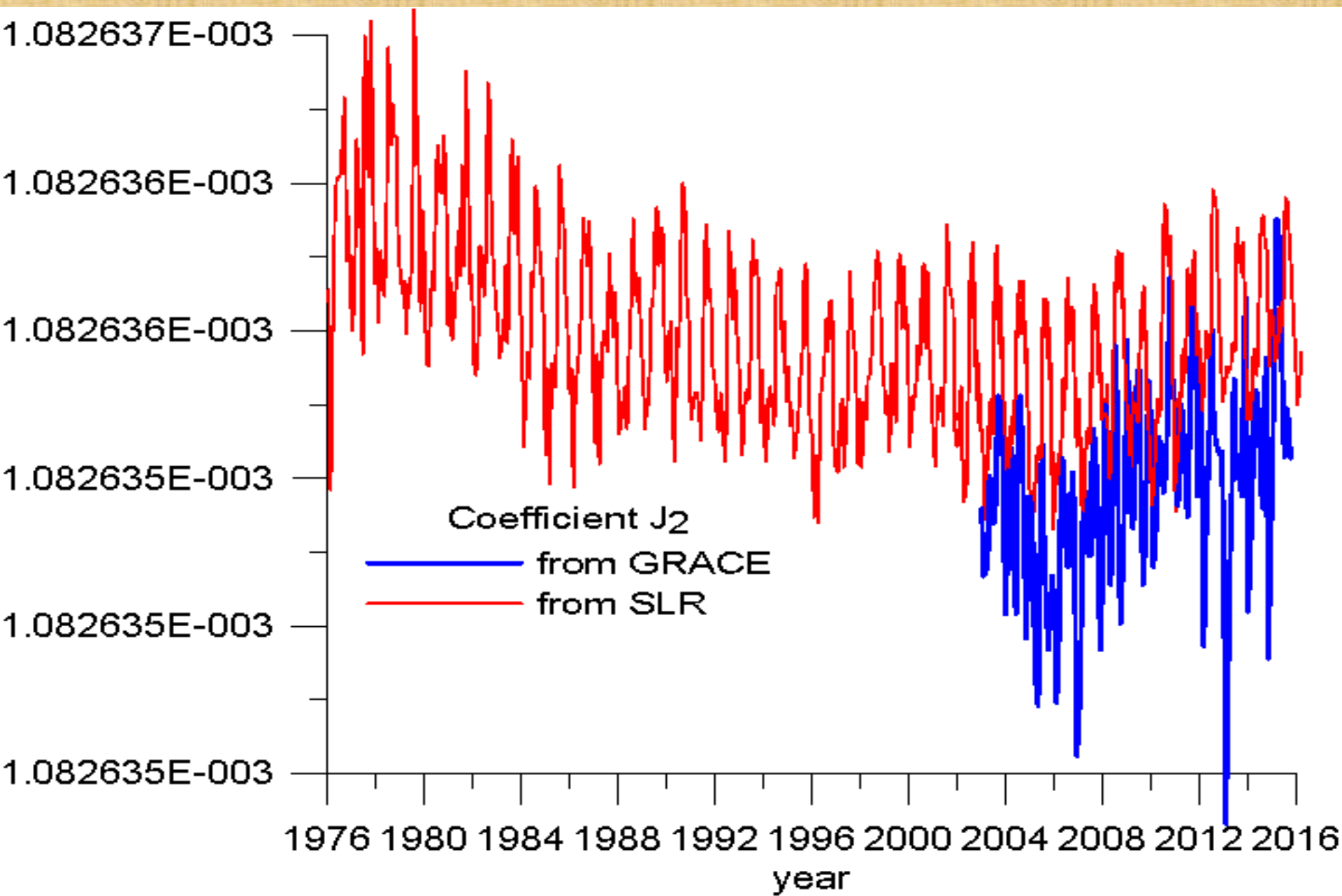
Среднее поле за 10 лет вычтено.

GIA эффект учтен по модели Paulson 2007.

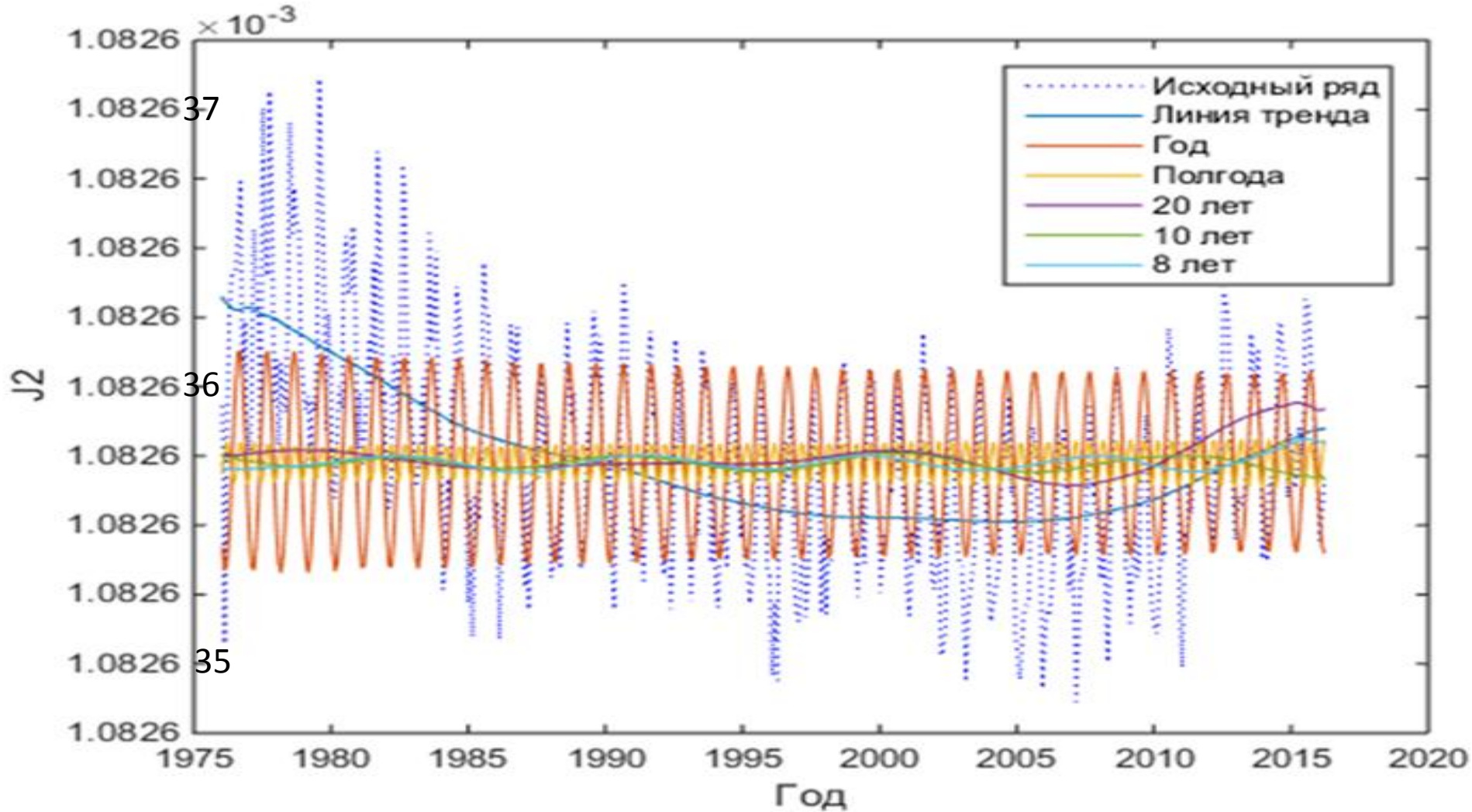
Результаты переведены в эквивалентный уровень воды (EWH, см), построены анимированные карты.

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

Вариации J_2 по ЛЛС и GRACE



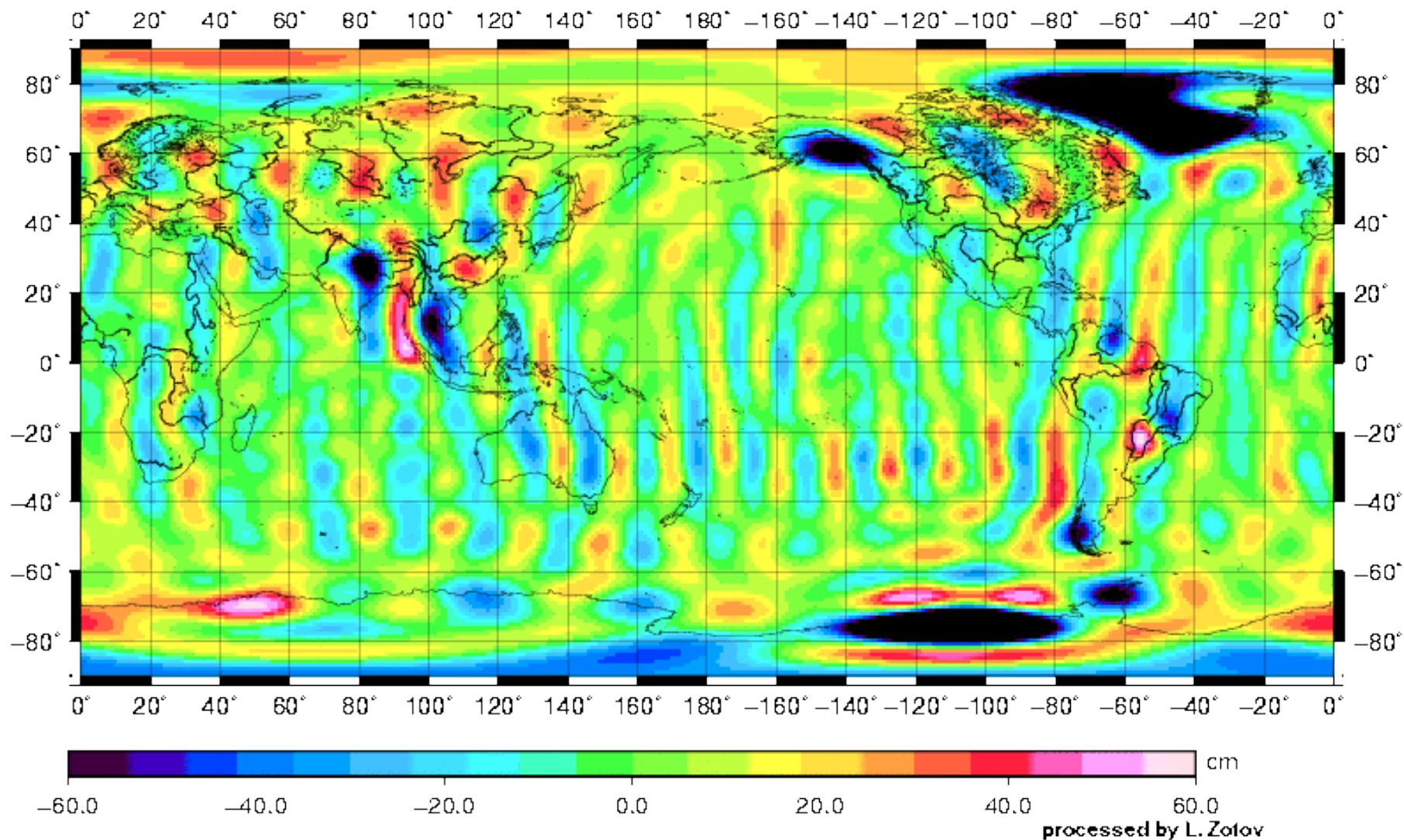
МССА – анализ вариаций J_2



Зотов Л.В., Балакирева Е.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ J_2 МЕТОДОМ ССА, Труды 4-й тектонофизической конференции, Москва, Октябрь 2016, ИФЗ РАН

Исходные данные GRACE JPL RL05 Level 2

2016-2003



Equivalent Water Height (EWH) – эквивалентный уровень воды

Многоканальный Сингулярный Спектральный Анализ МССА

1) Пусть имеется многомерный временной ряд, положим набор цифровых карт некоторого поля с постоянным шагом во времени Δt . Для каждой компоненты временного ряда – канала – в нашем случае коэффициентов Стокса $A(t_k)_{ij}$, строится траекторная матрица. Траекторные матрицы для всех компонент ij объединяются в блочную матрицу X

$$X_{A_{ij}} = \begin{pmatrix} A_{ij}(t_0) & A_{ij}(t_1) & \dots & A_{ij}(t_{K-1}) \\ A_{ij}(t_1) & A_{ij}(t_2) & \dots & A_{ij}(t_K) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{ij}(t_{L-1}) & A_{ij}(t_L) & \dots & A_{ij}(t_{N-1}) \end{pmatrix}$$
$$X = [X_{A_{1,1}}, X_{A_{2,1}}, X_{A_{1,2}}, \dots, X_{A_{ij}}, \dots, X_{A_{p-1,Q}}, X_{A_{p,Q}}]^T$$
$$K = N - L + 1$$

2) Выполняется SVD-разложение матрицы X

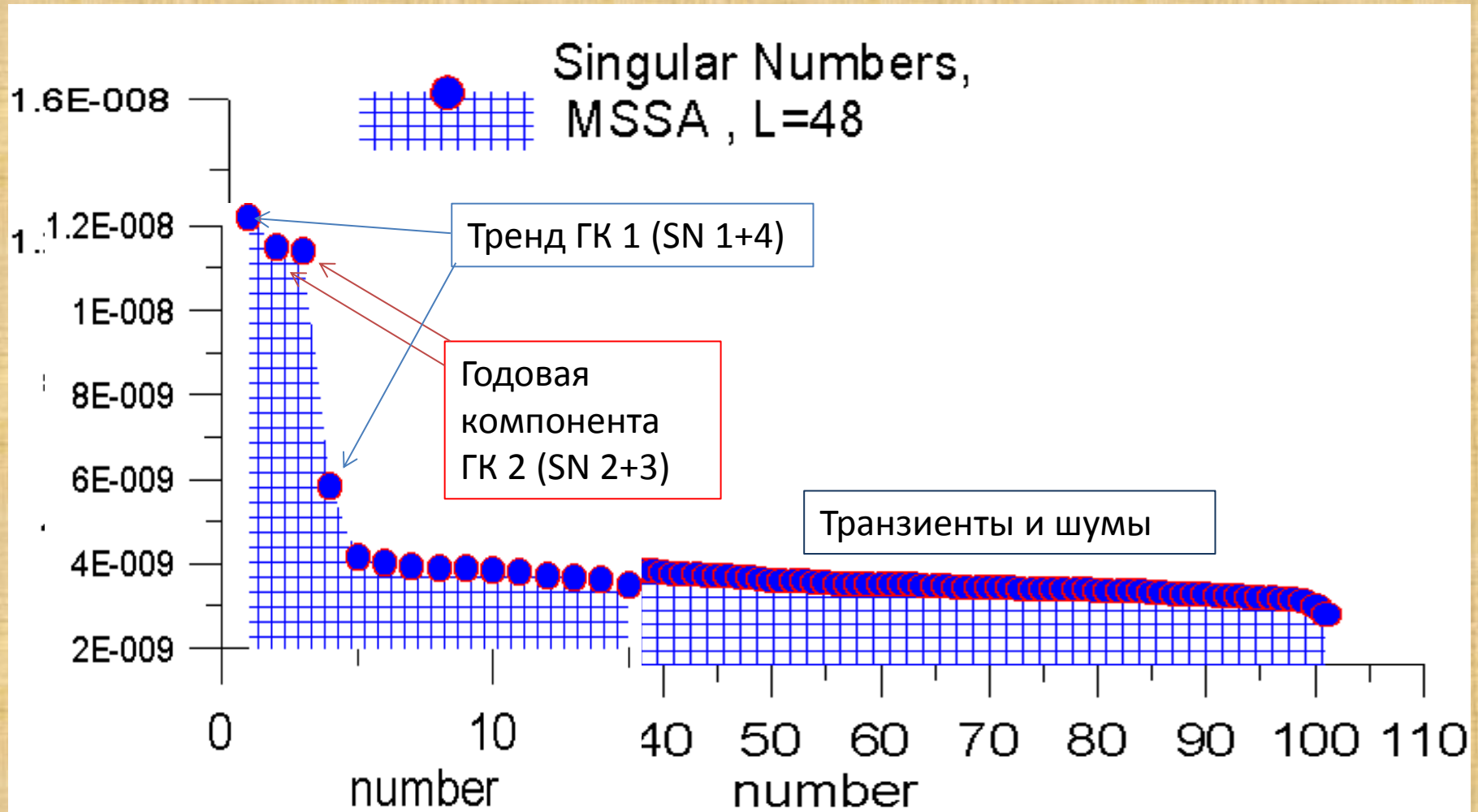
$$X = USV^T$$

3) Каждому сингулярному числу s_i соответствует главная компонента ГК. Компоненты со сходными свойствами группируются и для них получаются матрицы перемножением s_i на вектора u_i, v_i

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

4) Сигнал в каждом из каналов восстанавливается из матриц X^i для каждой ГК усреднением элементов вдоль боковых диагоналей (операция Генкелизации).

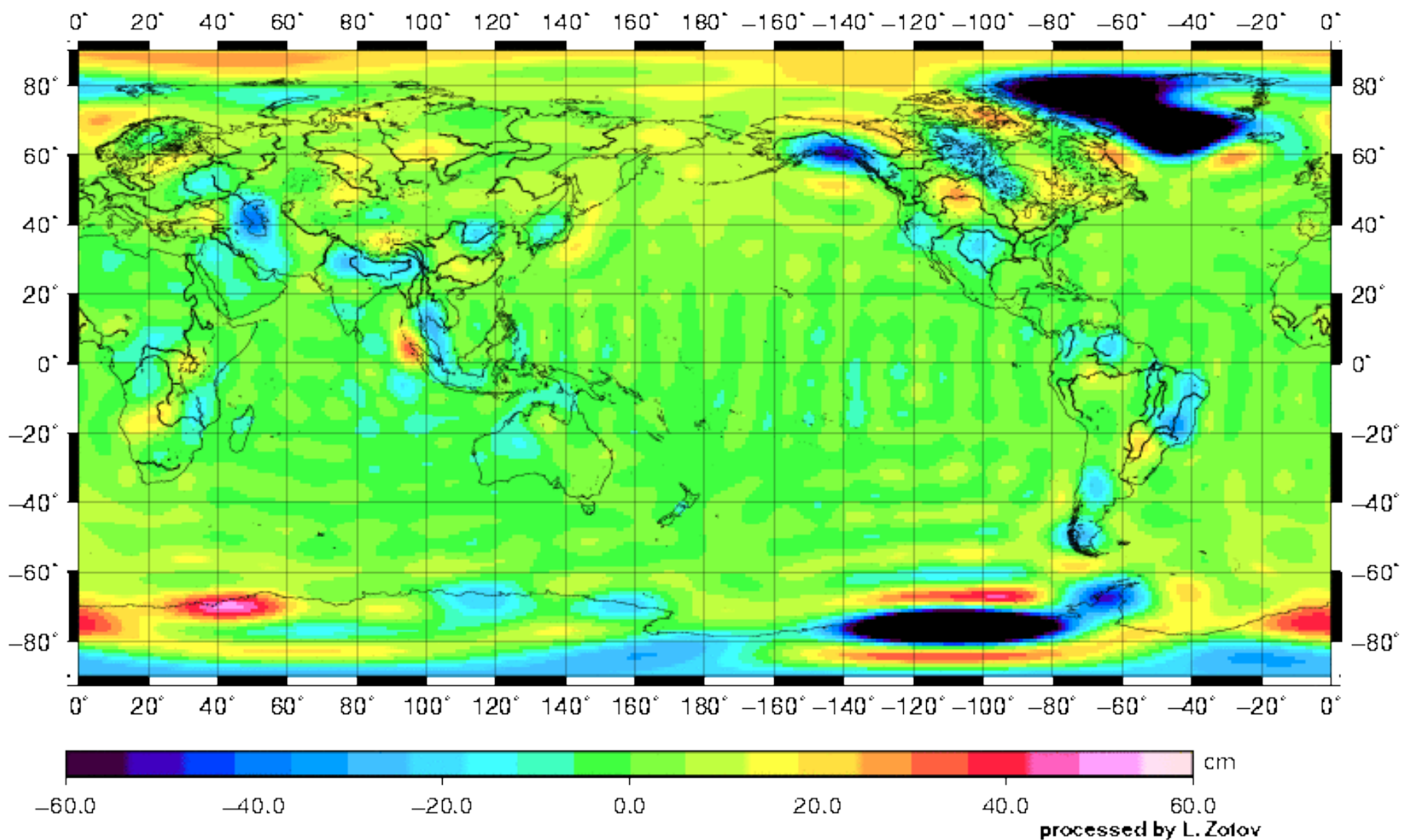
МССА данных GRACE – сингулярные числа L=48 месяцев (4 года)



L. Zotov, C.K. Shum. Singular spectrum analysis of GRACE observations, American Institute of Physics Proceedings, of the 9th Gamow summer school, 2009, Odessa, Ukraine.

Главная Компонента (ГК или РС) - ГК 1

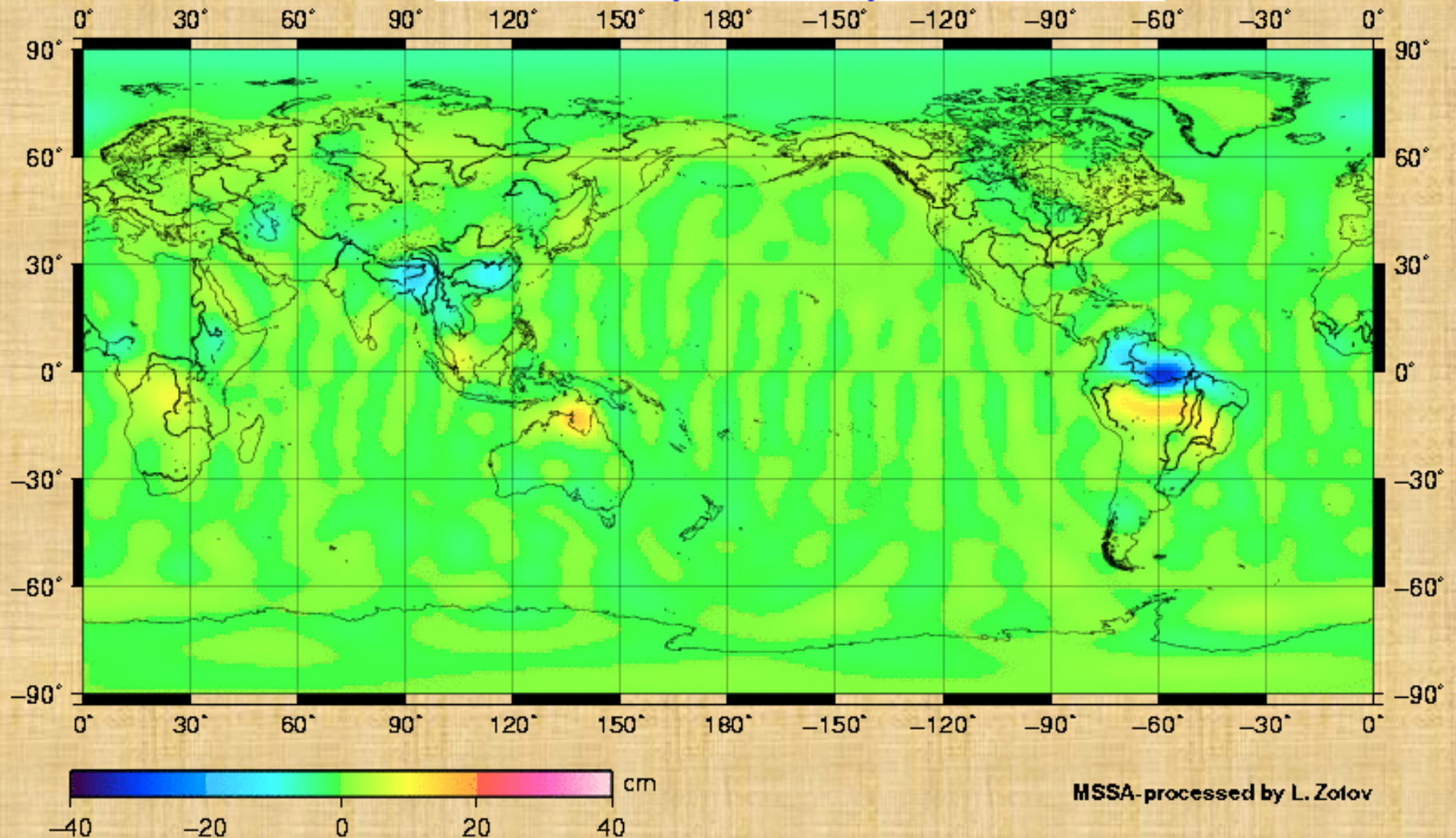
2016-2003



MCCA, L=48 мес

Годовой цикл – Главная Компонента (ГК или РС) 2

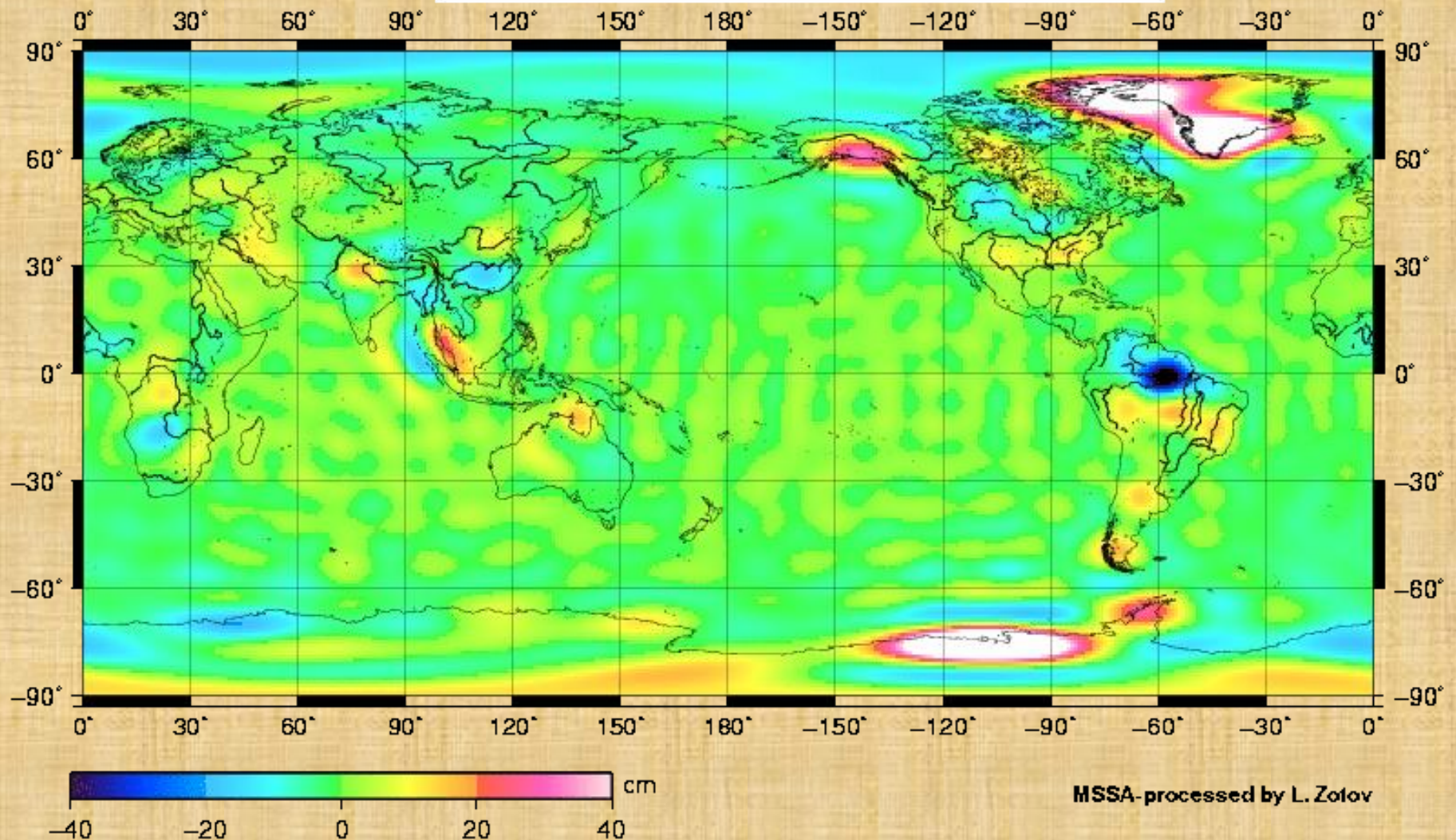
РС 2 (SN 2+3) 01/2003



MCCA, L=48 мес

Сумма первых 10 ГК

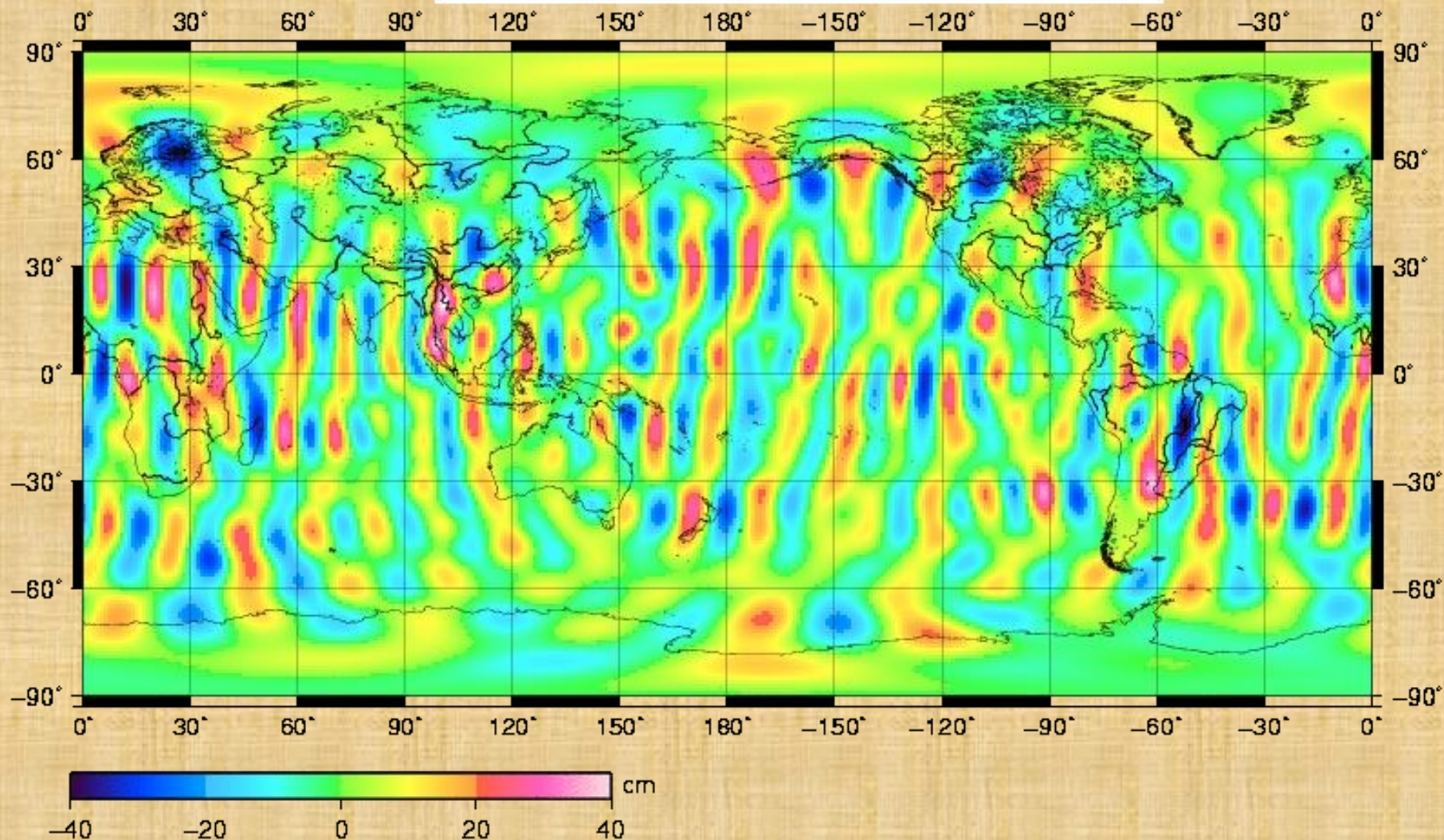
sum SN 1-10 01/2003



MCCA, L=48 мес

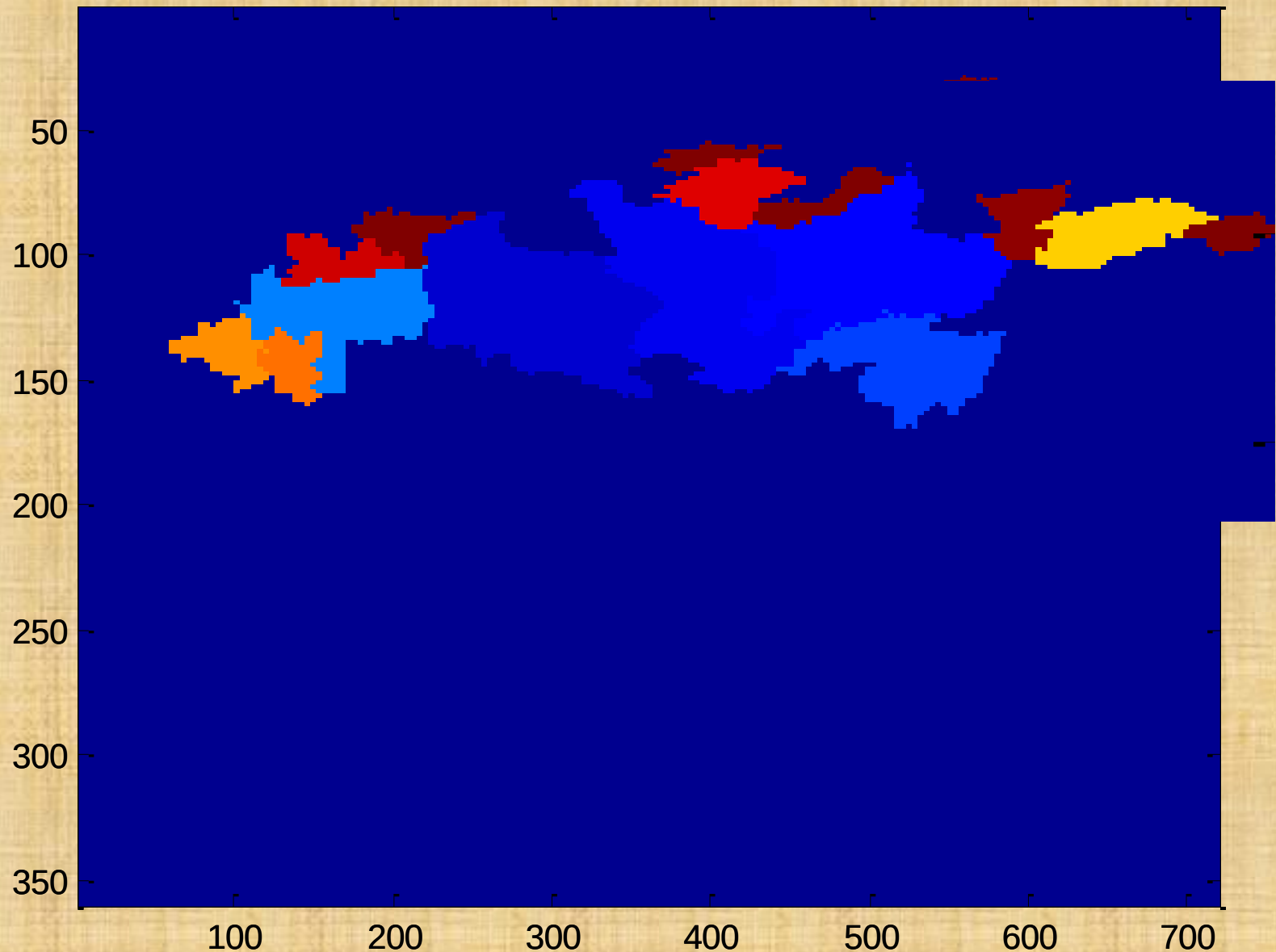
Остаточные компоненты ГК с номером >10

difference 01/2003

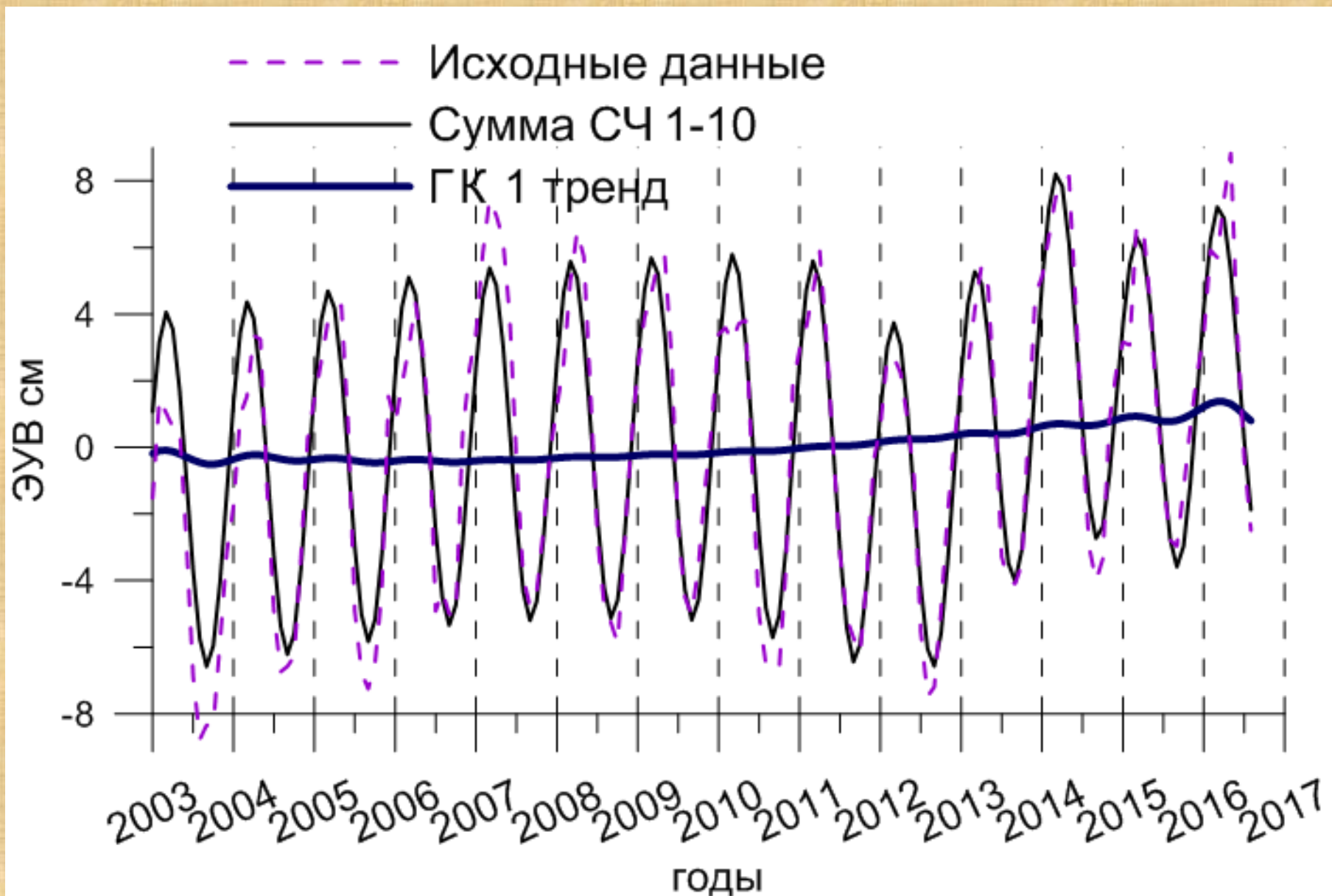


MCCA, L=48 мес

База Simulated Topological Networks (STN-30p) Использована для выделения бассейнов 15 рек России

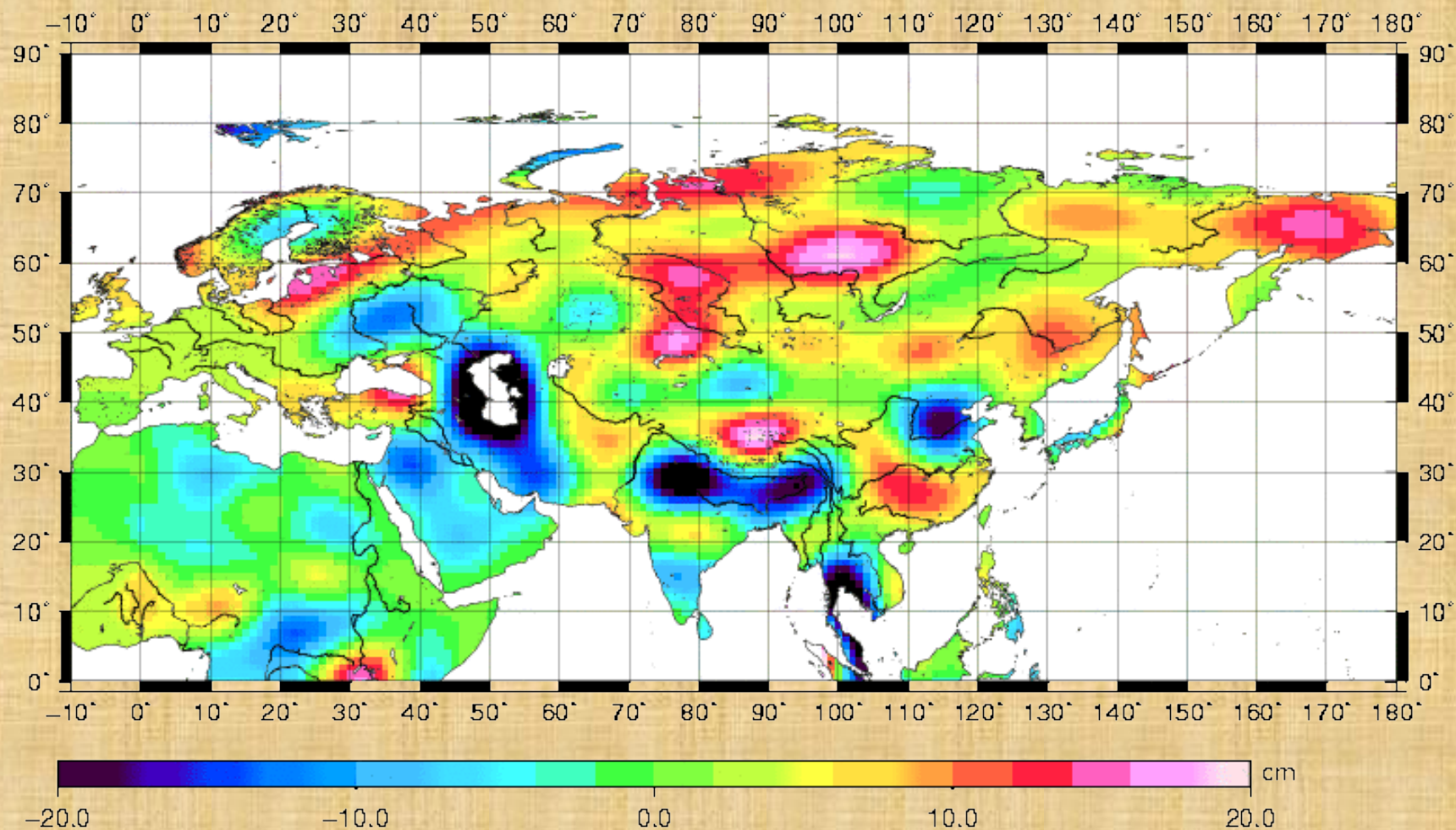


Аномалии масс (усредненное поле) в бассейнах 15 крупных рек России



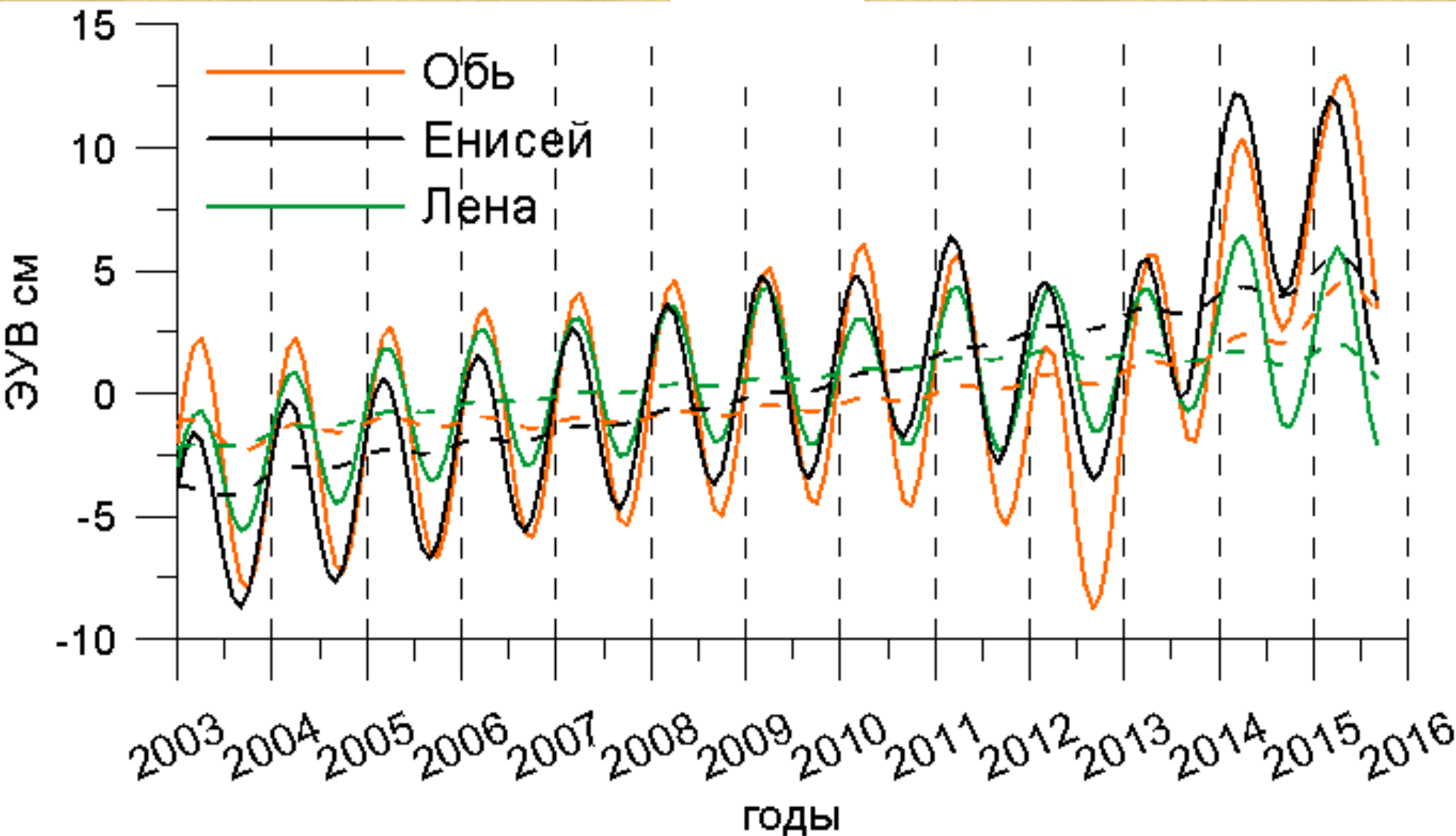
Разность между 2016 и 2003 для тренда (ГК 1)

2016-2003

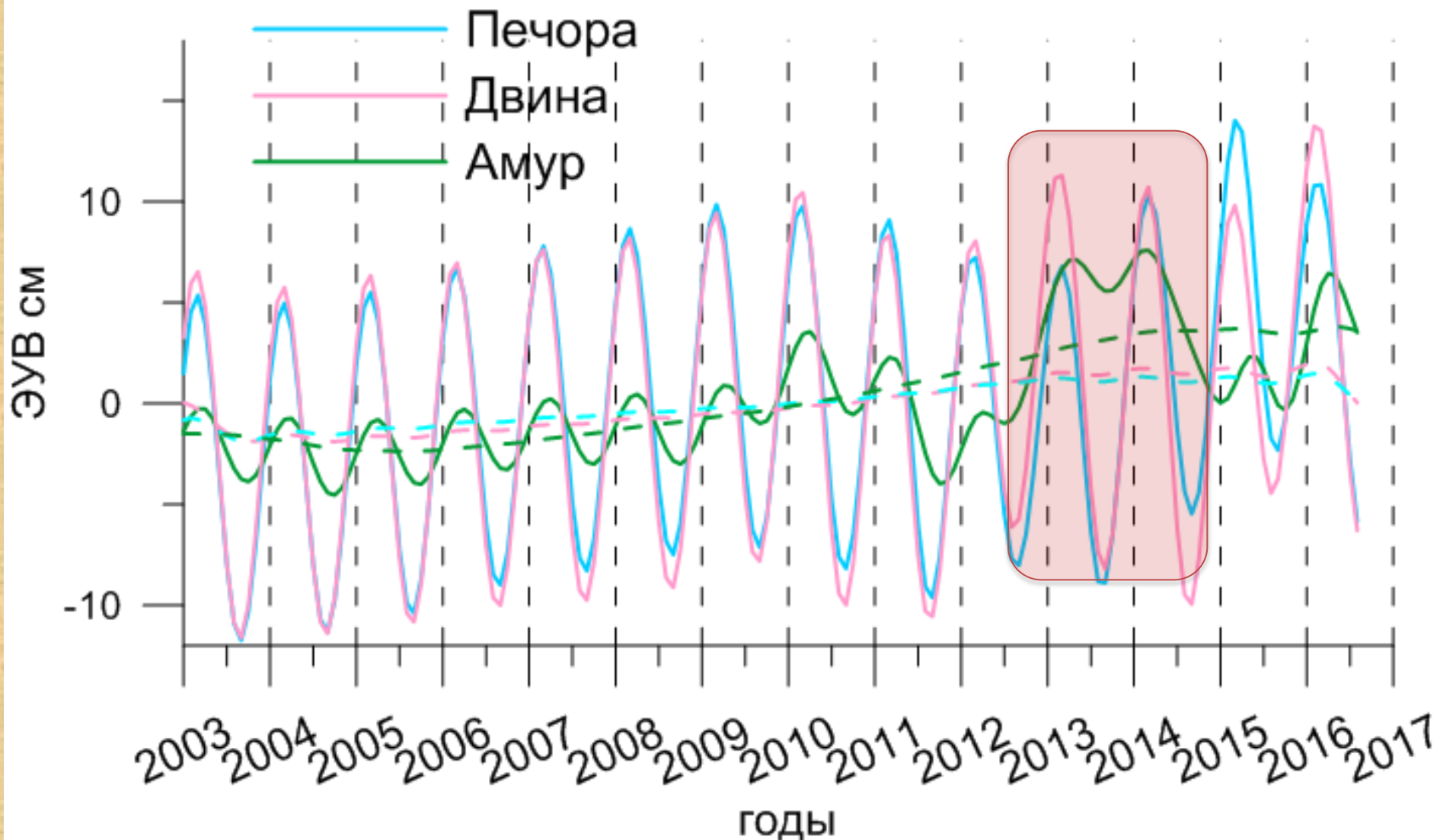


processed by L. Zotov

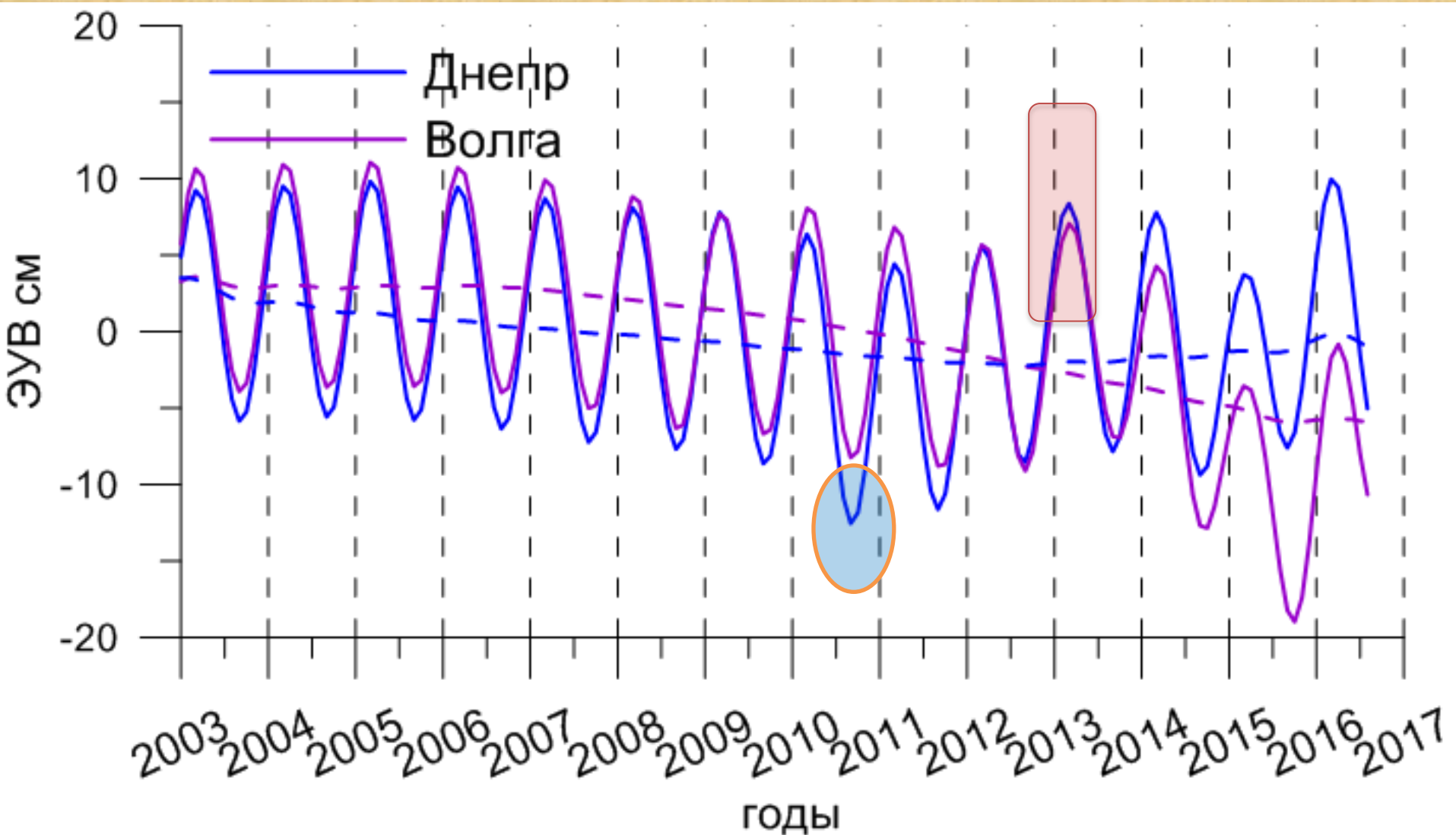
Изменения в бассейнах рек Сибири



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. Области 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.

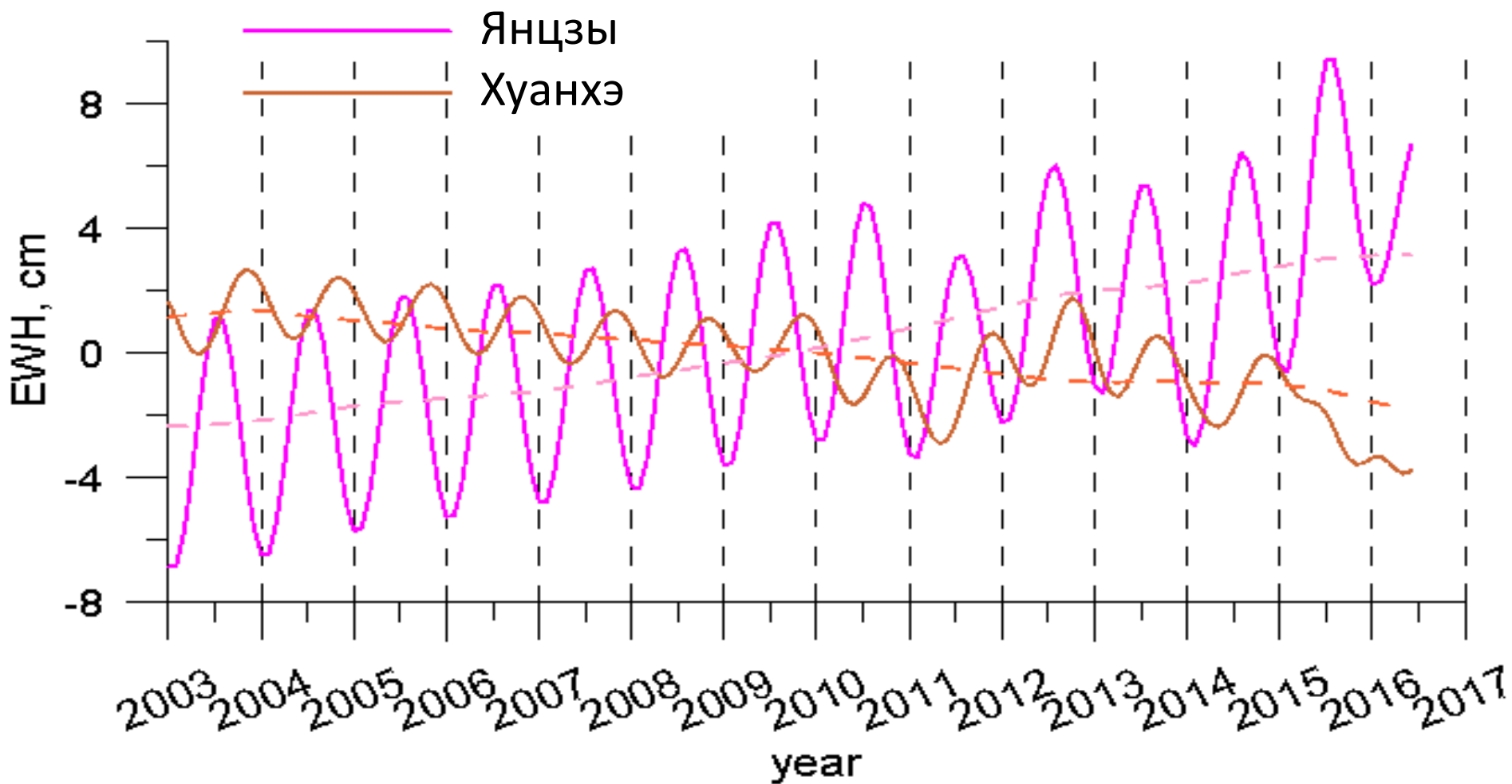
ISSN 0022-874X
ПРИРОДА
5 16



3 Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Шам С.К. Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России

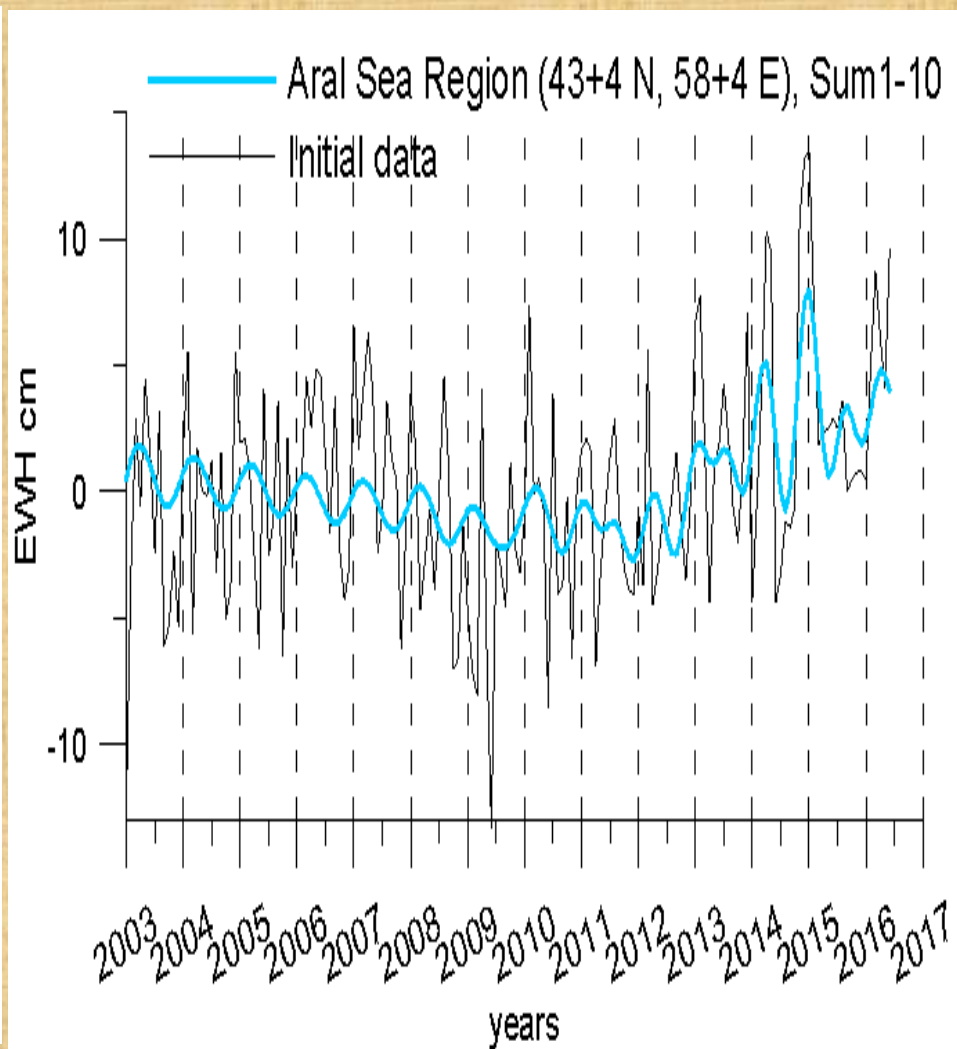
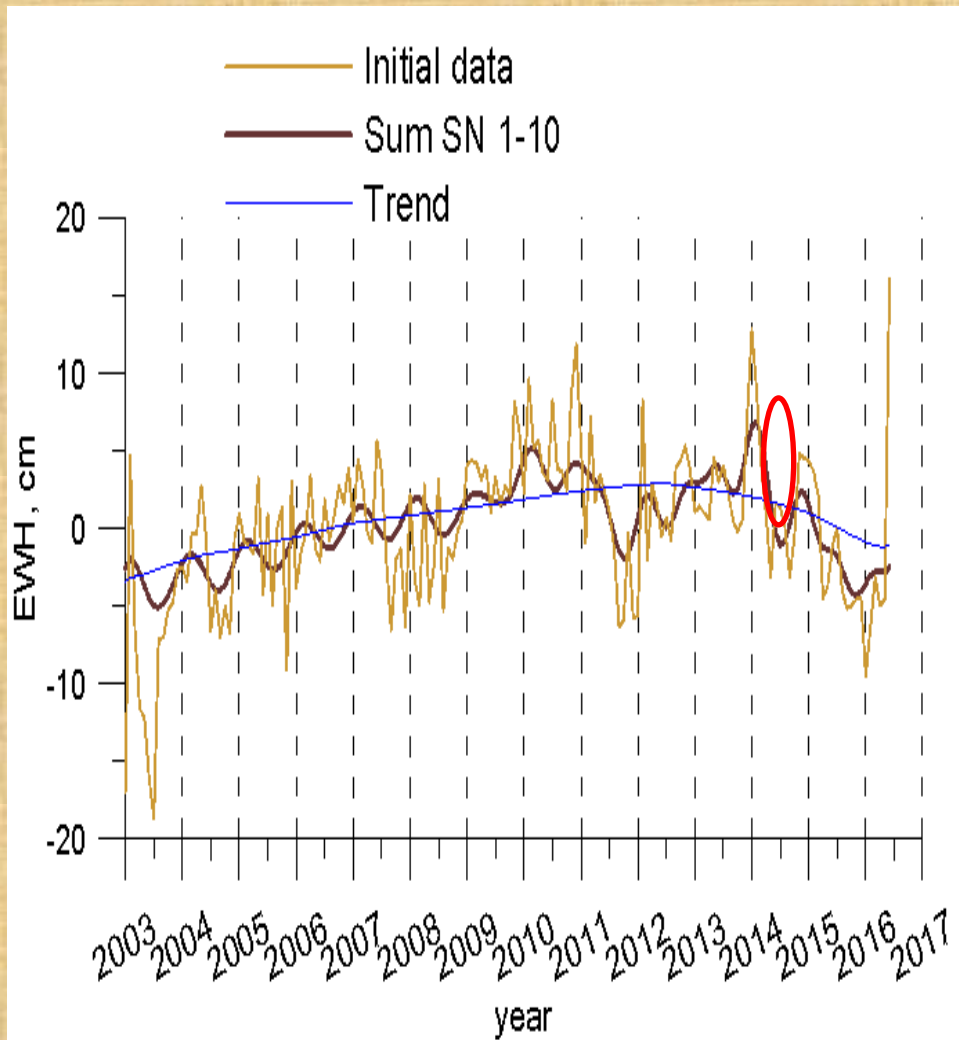
Спутниковая система GRACE, действующая на орбите Земли с 2002 г., позволяет изучать гравитационные аномалии и их временные вариации, обусловленные процессами массопереноса в оболочках Земли. На основе анализа гравитационных отклонений, зарегистрированных с помощью спутников GRACE, удалось оценить изменчивость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

Изменения масс на больших реках Китая

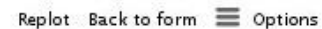




Засухи на озере Байкал и Аральское море



Satellite



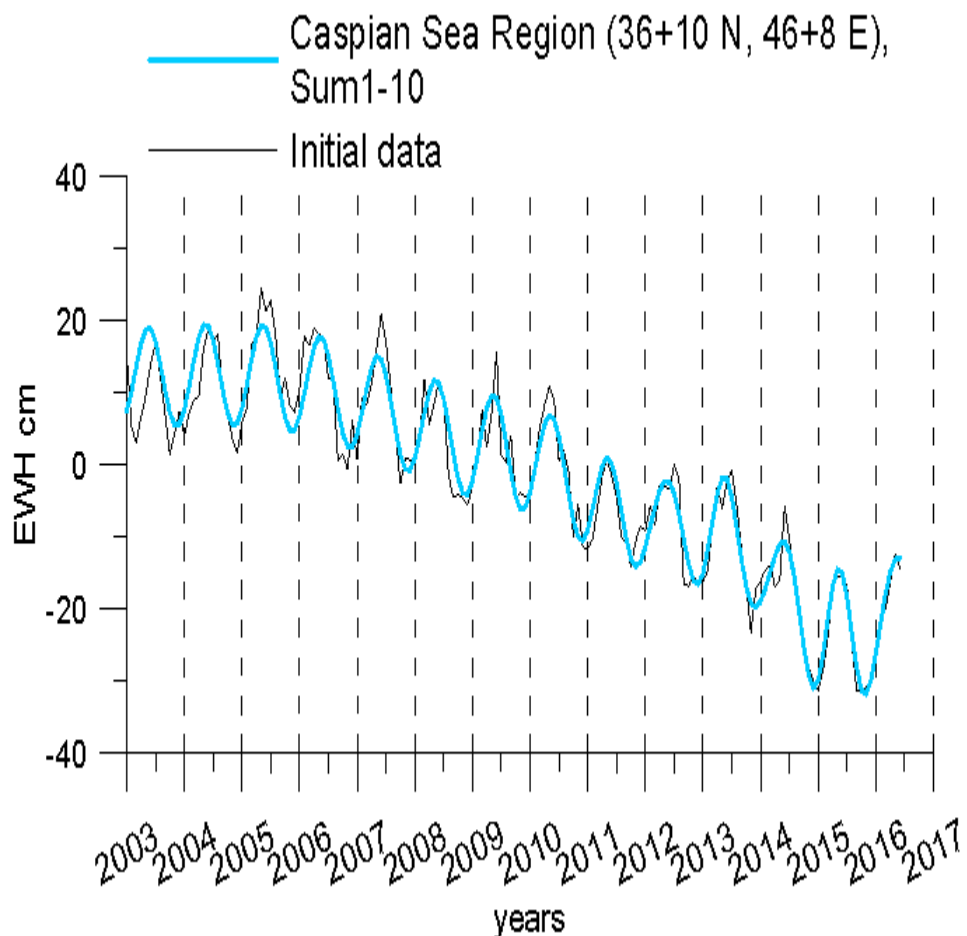
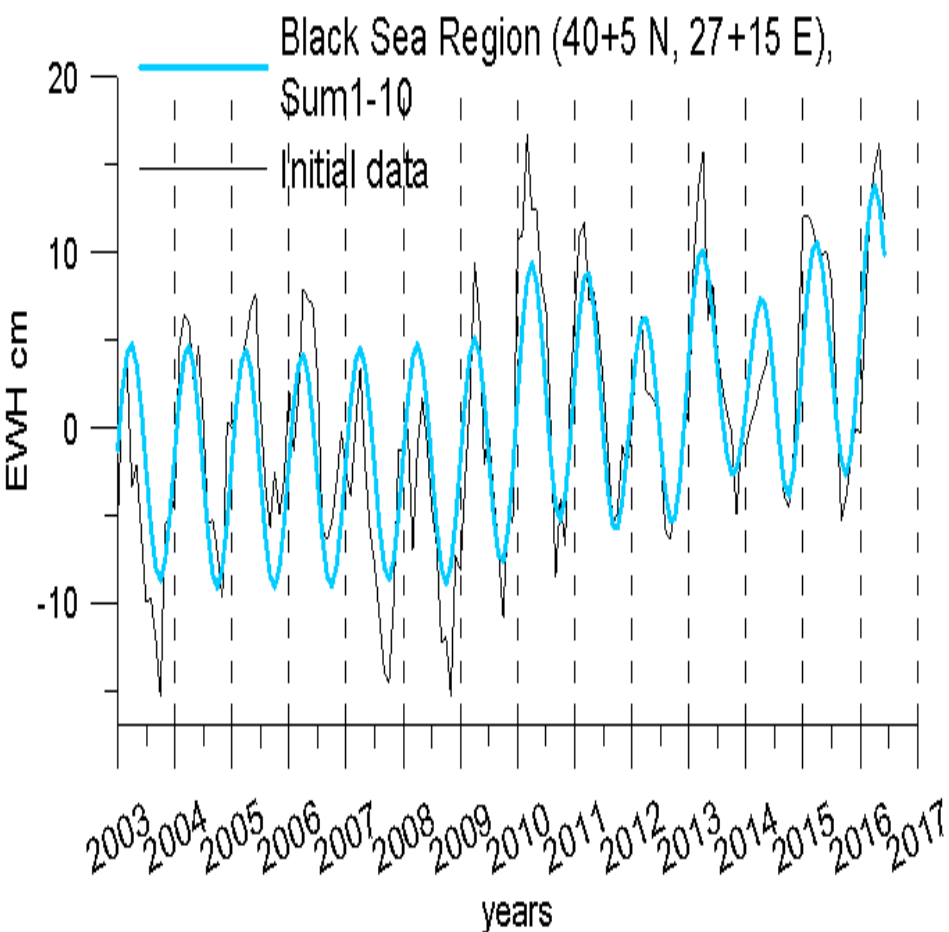
692691, Россия, Приморский край (45.00°N, 132.00°E)



www.theglobalwater.com by CNES/GRCS



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

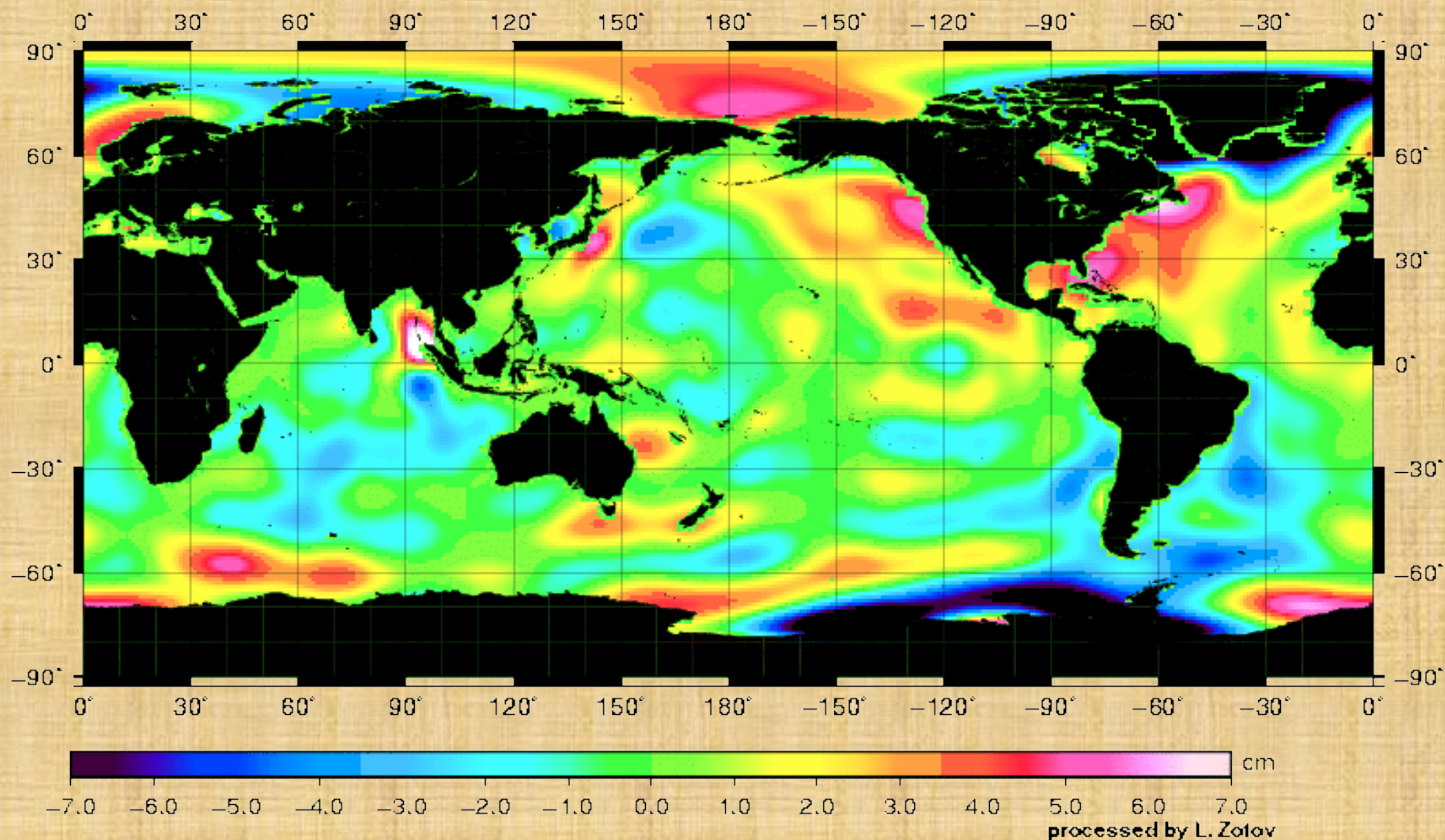


Исходные и обработанные МССА данные (с включением гидрологии суши)

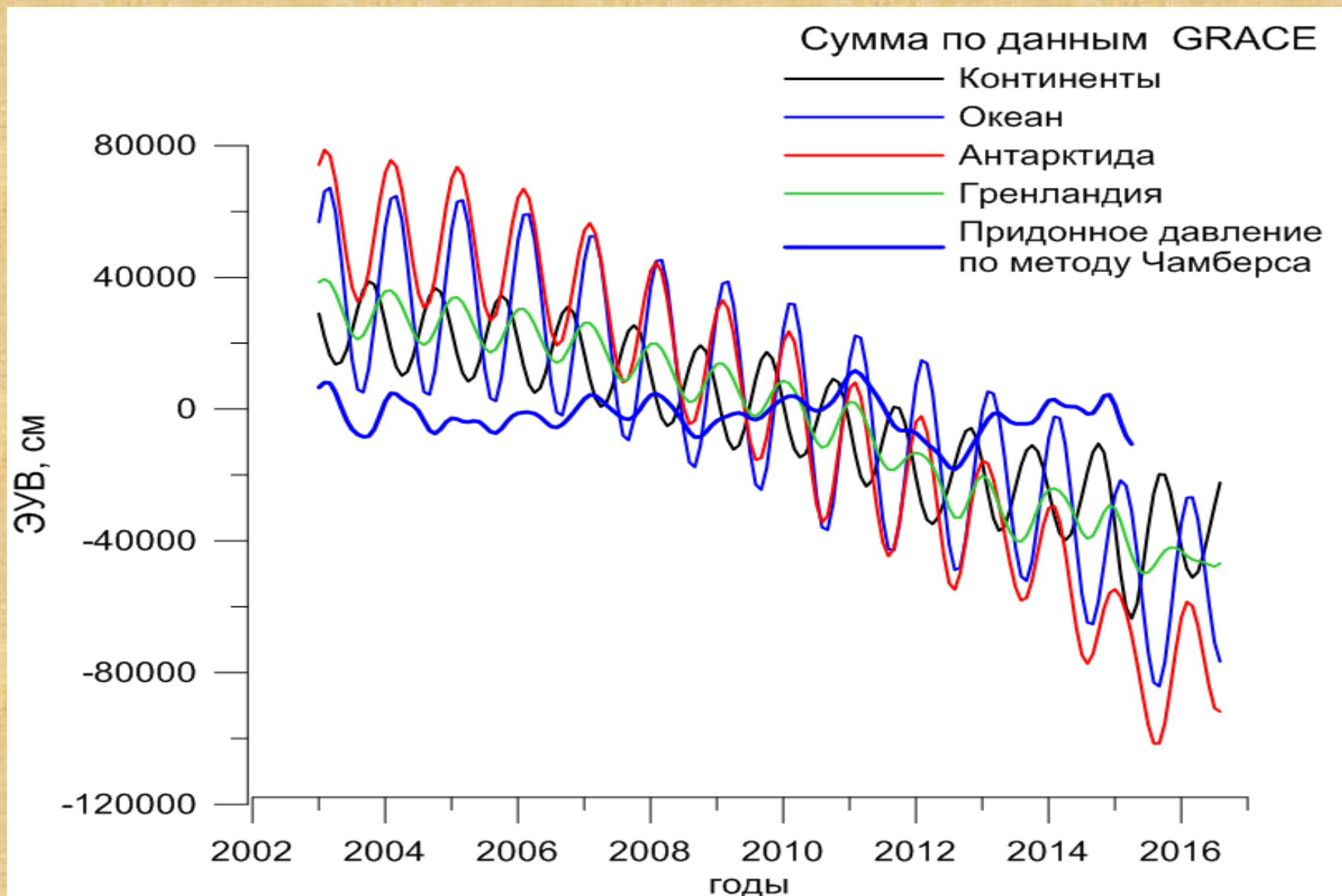
L. Zotov, V. Vlasova, Variations of the ocean bottom pressure from GRACE satellites
proceedings of Complex study of Russian seas conference , Sevastopol, Russia, April 2016.

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

PC 1 2003-2015

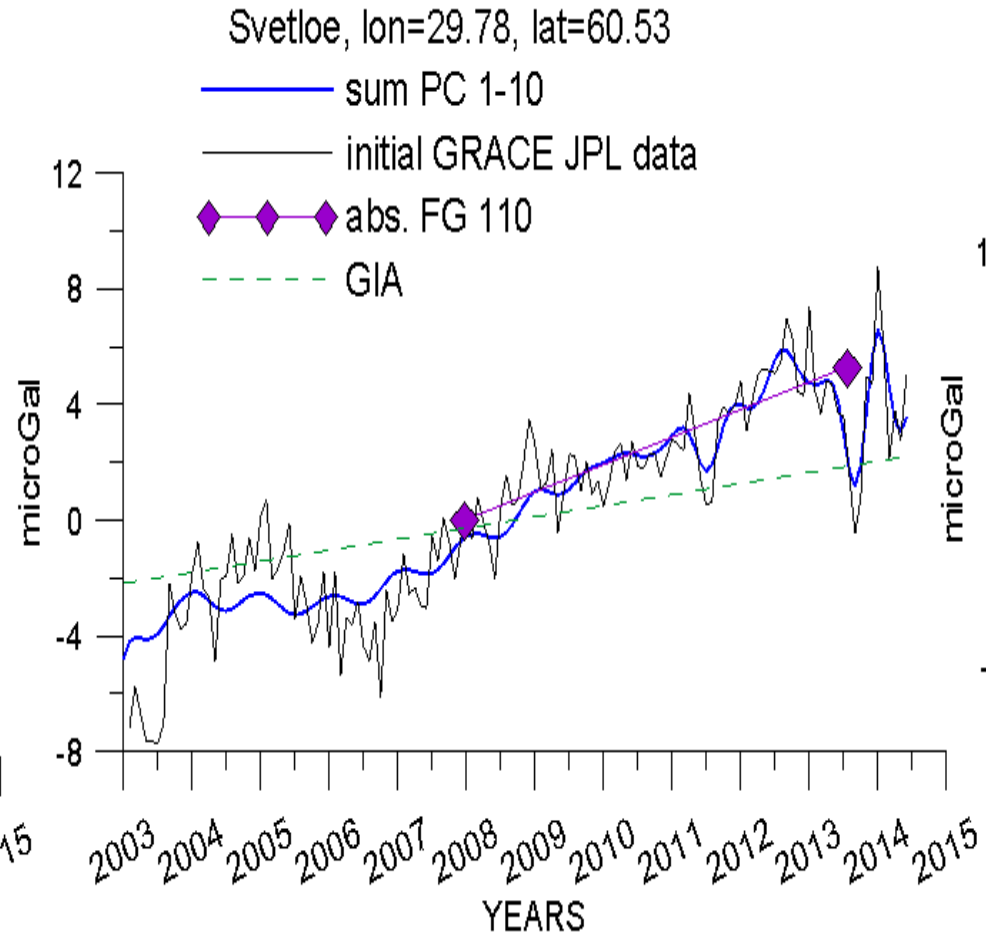
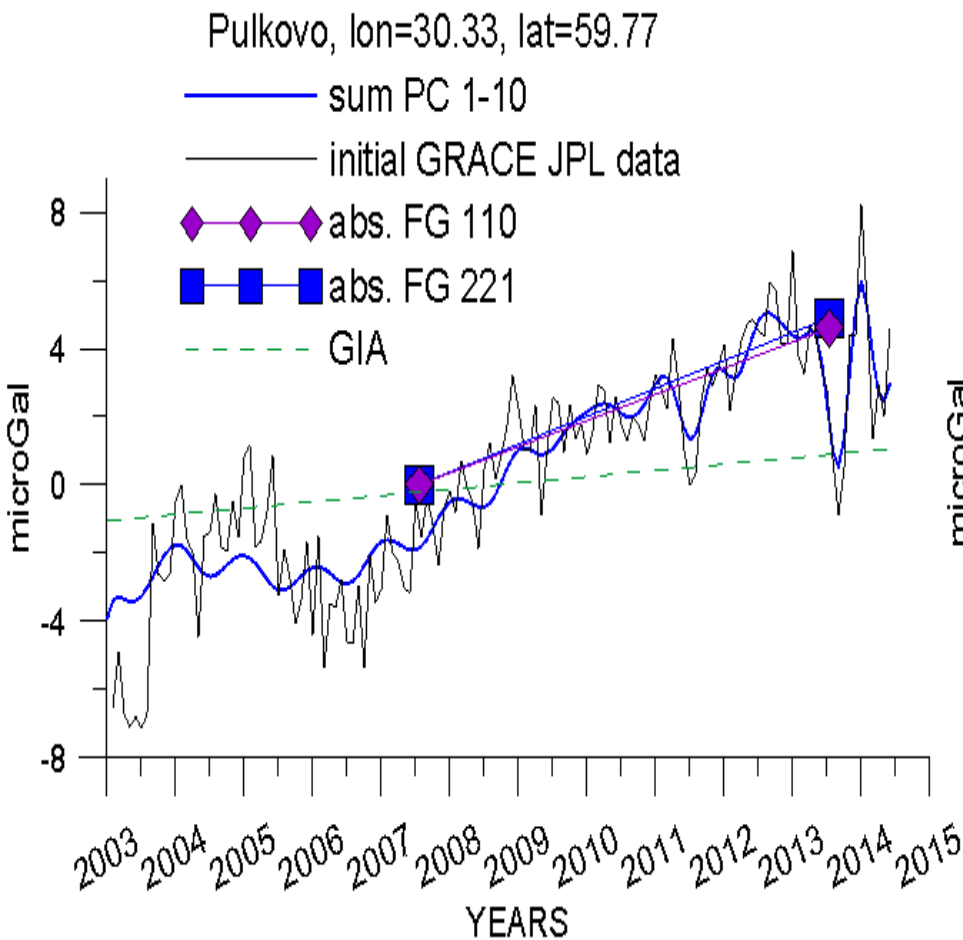


Глобальные перераспределения масс по данным GRACE



Сравнение данных GRACE с данными абсолютной гравиметрии

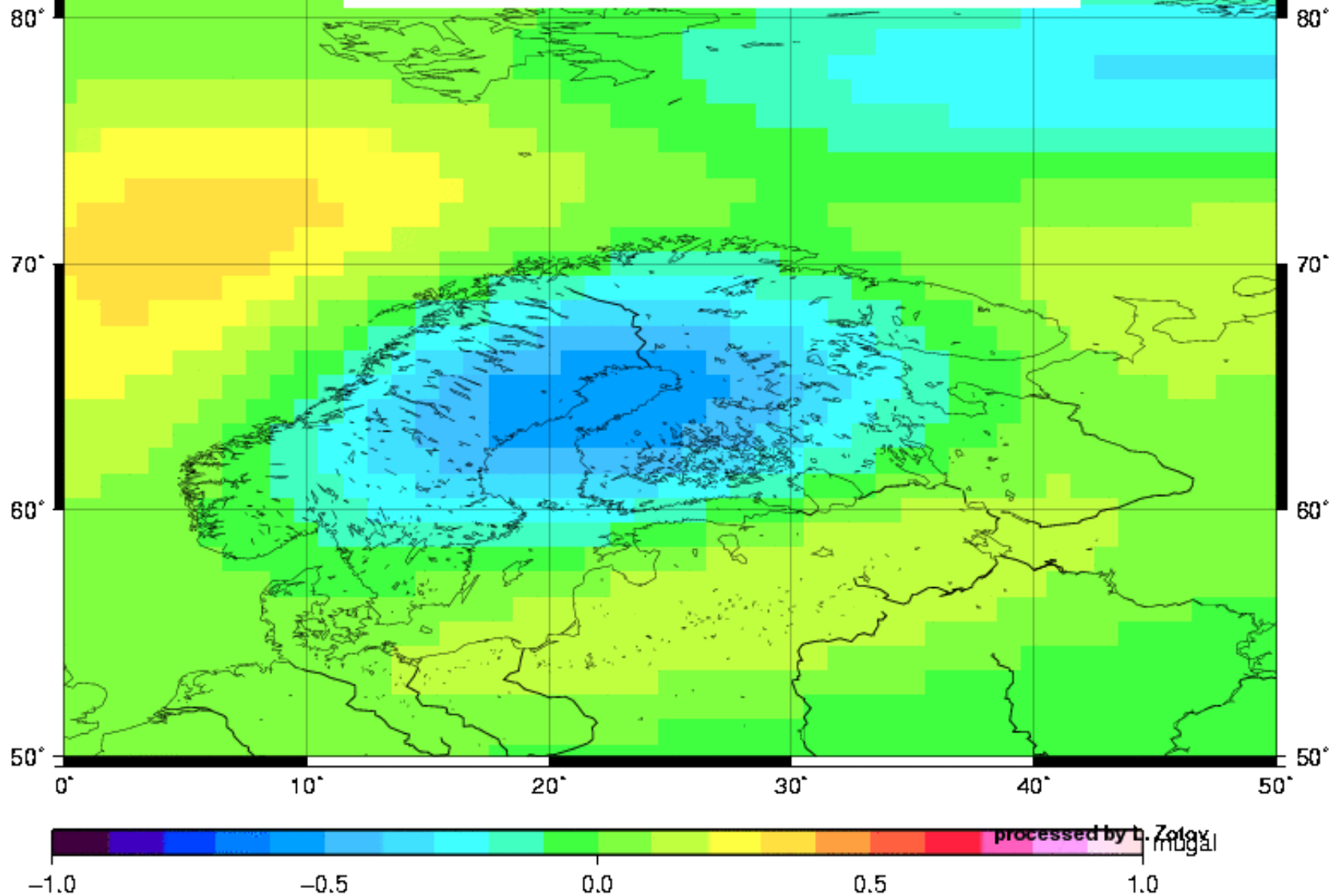
Leonid Zotov^{1,5} (wolftempus@gmail.com), Viktor Yushkin^{1,2}, Jaakko Makinen³, Mirjam Bilker-Koivula³, Roman Sermyagin² and Natalya Frolova⁴



Послеледниковое поднятие Glacial isostatic adjustment GIA

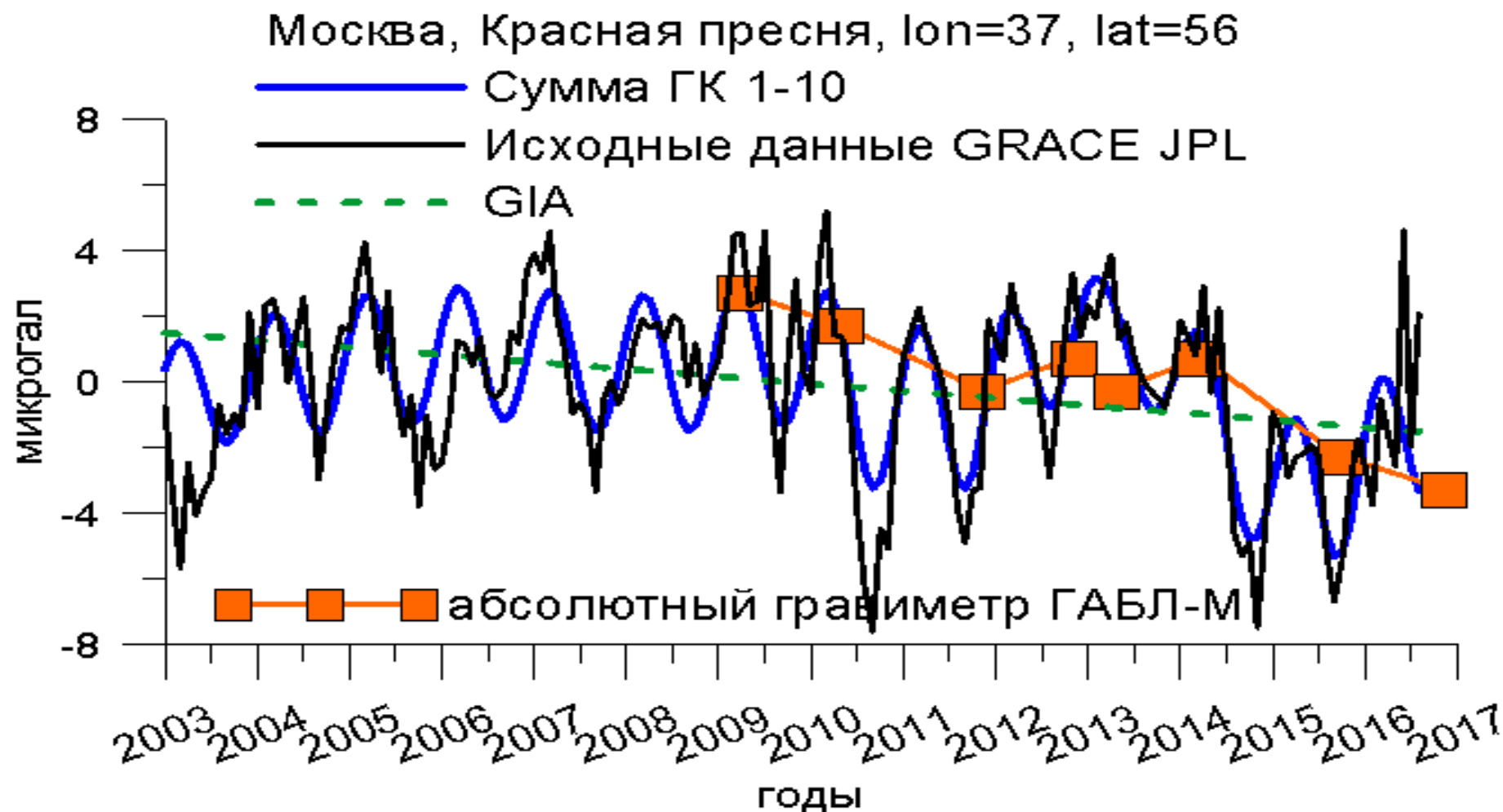
Над Скандинавией

Sum PC 1-10 2003/01

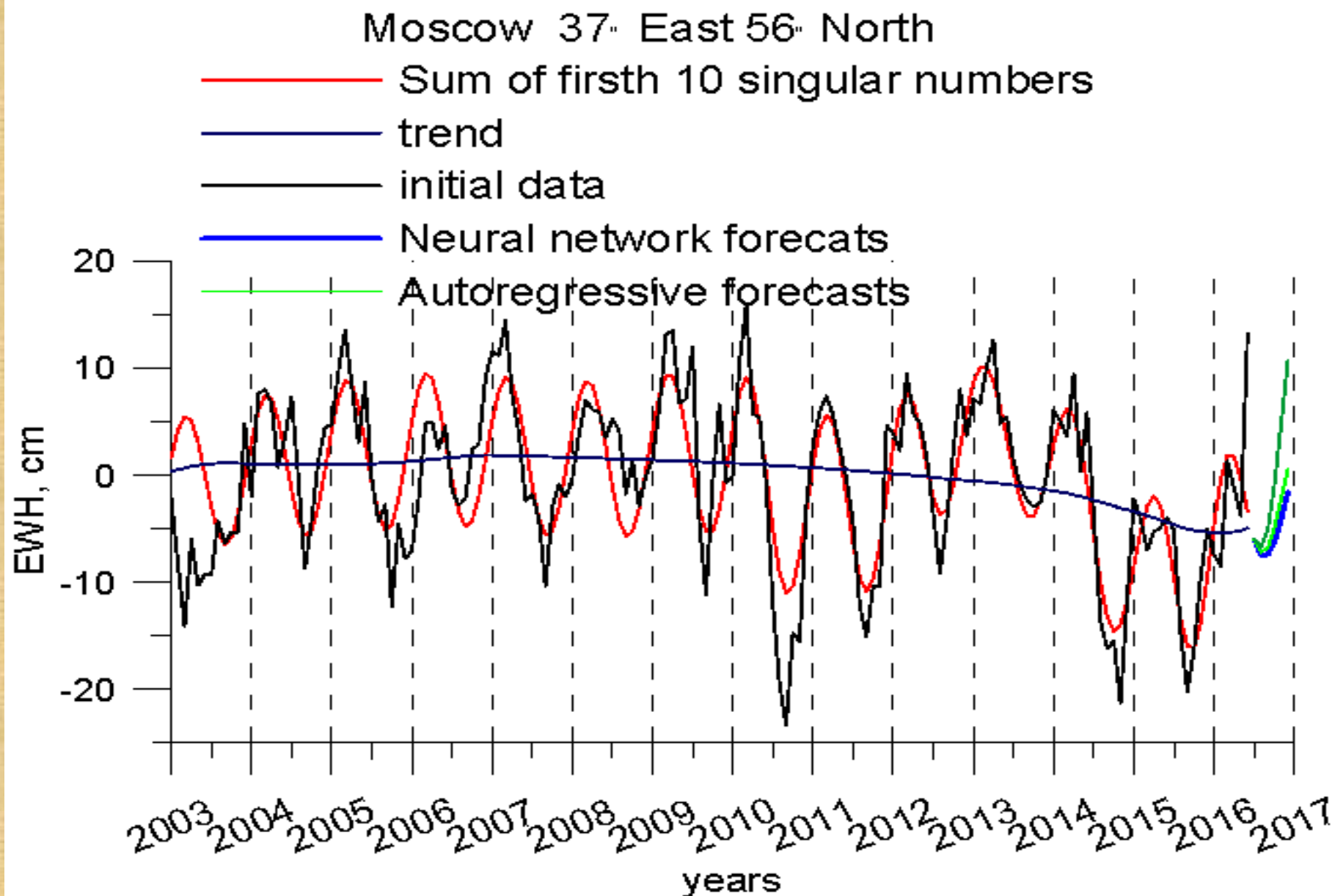


Сравнение данных GRACE с данными абсолютной гравиметрии

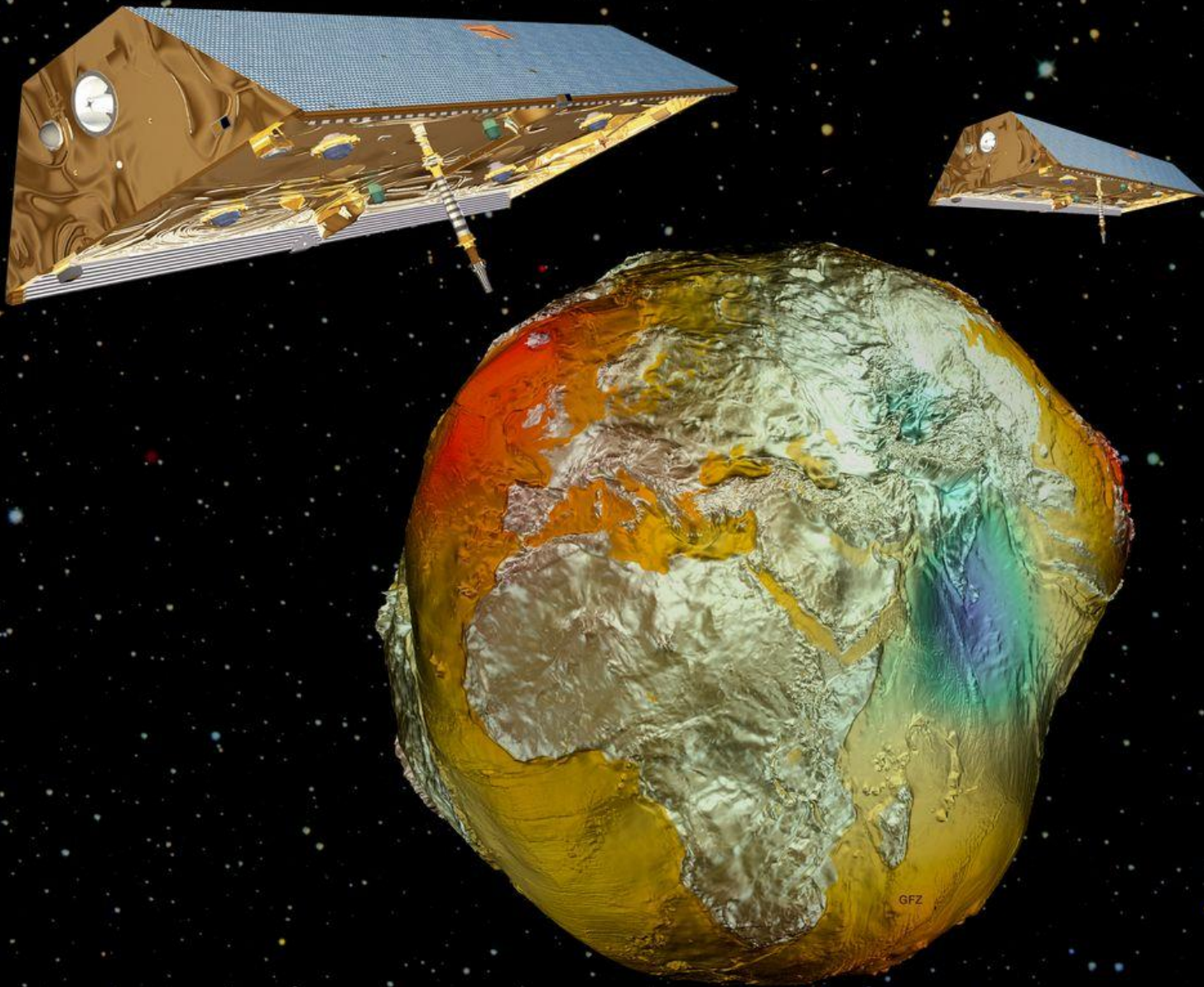
Данные абсолютных гравиметров предоставил Виктор Юшкин
Главный гравиметрический пункт СССР



Сложность прогнозирования



Спутники GRACE



Изменения климата и вращение Земли

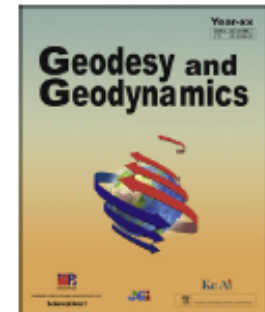
GEODESY AND GEODYNAMICS 2016, VOL X NO X, 1–7

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.keaipublishing.com/en/journals/geog;
http://www.jgg09.com/jweb_ddcl_en/EN/volum/home.shtml

Ke Ai
ADVANCING RESEARCH
EVOLVING SCIENCE



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



[Geodesy and Geodynamics](#)

[Volume 7, Issue 3, May 2016, Pages 216–222](#)

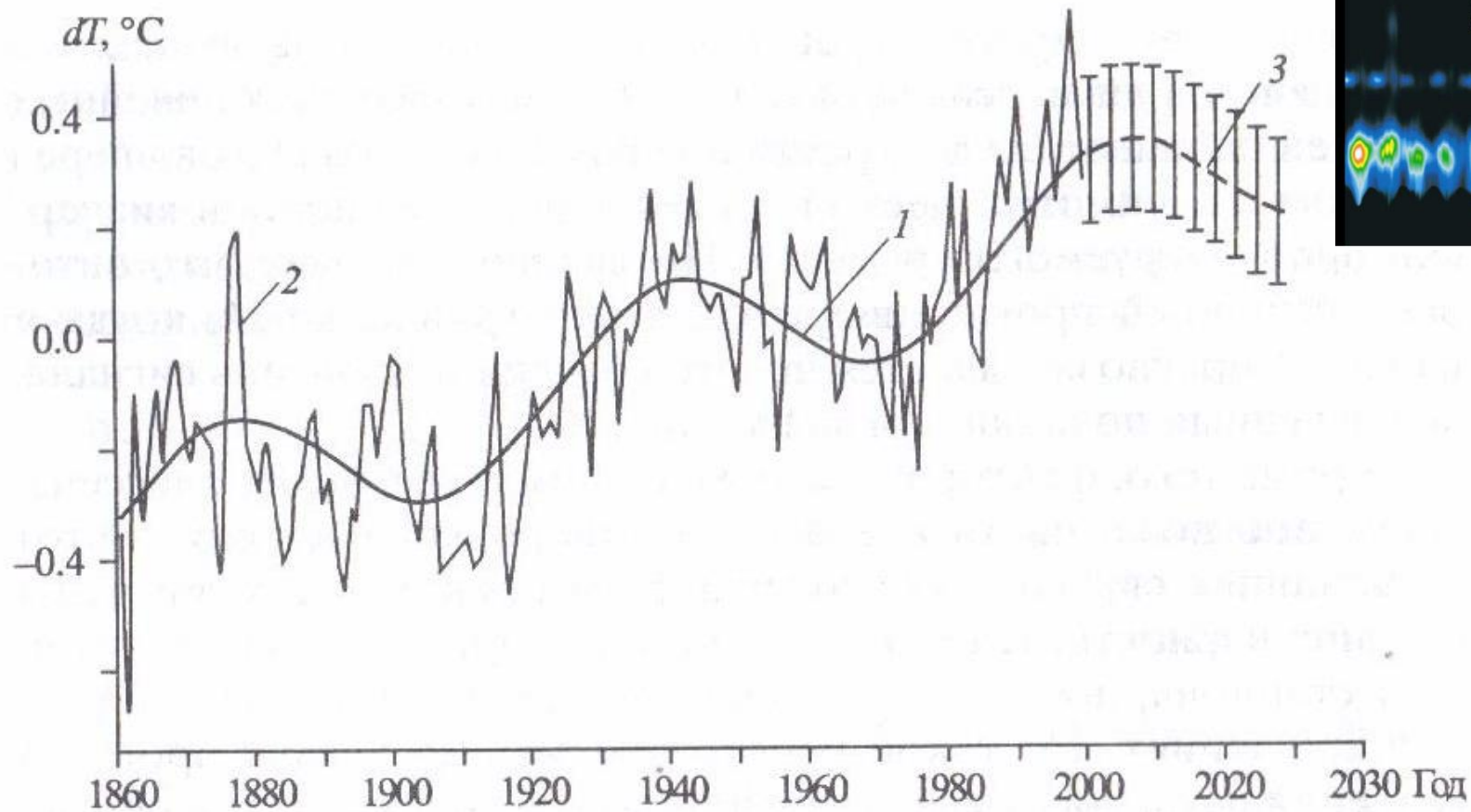
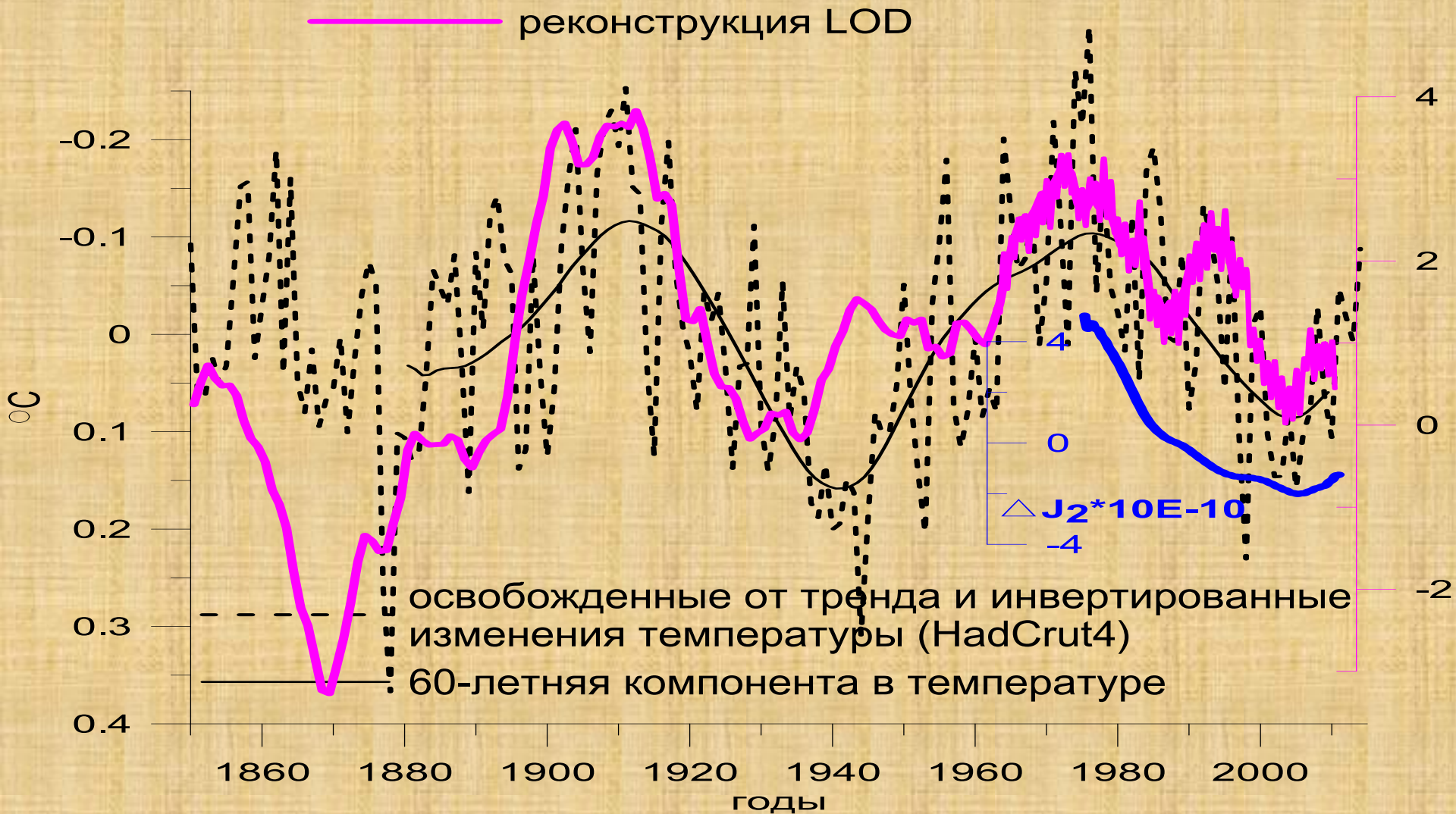


Рис. 1.1. Циклический тренд глобальной температурной аномалии (1), межгодовые вариации dT (2) и поведение тренда на 2000–2030 гг. (3)

Длительность суток LOD и аномалия температуры



Выводы

- Гравитационное поле со спутников GRACE позволяет изучать перераспределения масс в оболочках Земли, в том числе водных
- Многоканальный сингулярный спектральный анализ – подходящий метод для обработки многомерных спутниковых данных
- Данные космической гравиметрии крайне полезны в гидрологии, они отражают наводнения и засухи
- Получены усредненные кривые гравитационного поля в бассейнах крупных рек России
- Построена карта тренда по территории России, на которой заметно уменьшение массы в районе Каспия, увеличение у истоков Лены и Иртыша, что может быть связано с деградацией вечной мерзлоты и т.п.
- Особо интересен вопрос перераспределения масс вследствие изменений климата и взаимосвязь с вращением Земли
- Мы надеемся, что запуск миссии по космической гравиметрии GRACE Follow-on в 2017 г. с существенно усовершенствованным оборудованием (лазерный дальномер и др.) позволит проводить дальнейшие исследования на более высоком уровне.

Благодарю за внимание!

