



ГИДРОЛОГИЯ

Лектор: проф. кафедры гидрологии
суши Фролова Наталья Леонидовна

Лекция 2



Важнейшие процессы в гидросфере

Распределение воды на планете

■ 71% поверхности планеты занято водой

■ 29% - сушей

■ $F_{\text{пов}} \text{ Земли} = 510 \text{ млн. км}^2$

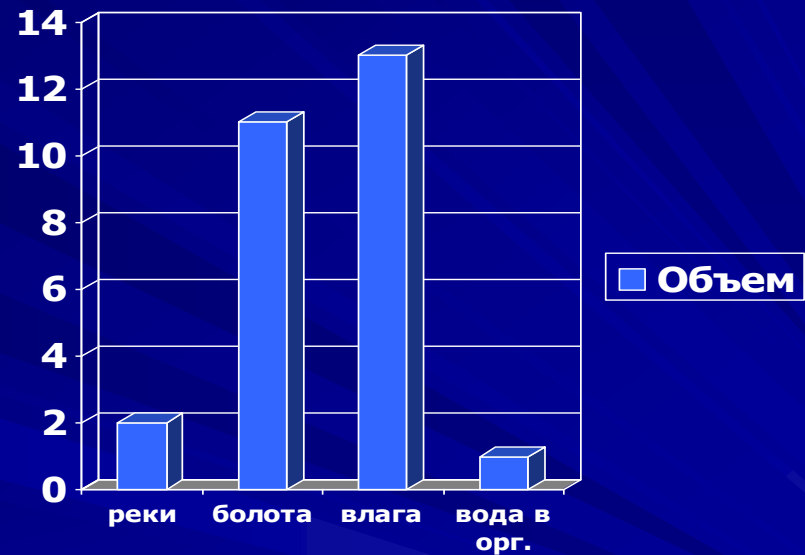


Распределение воды по объектам гидросферы (1390 млн. км³)

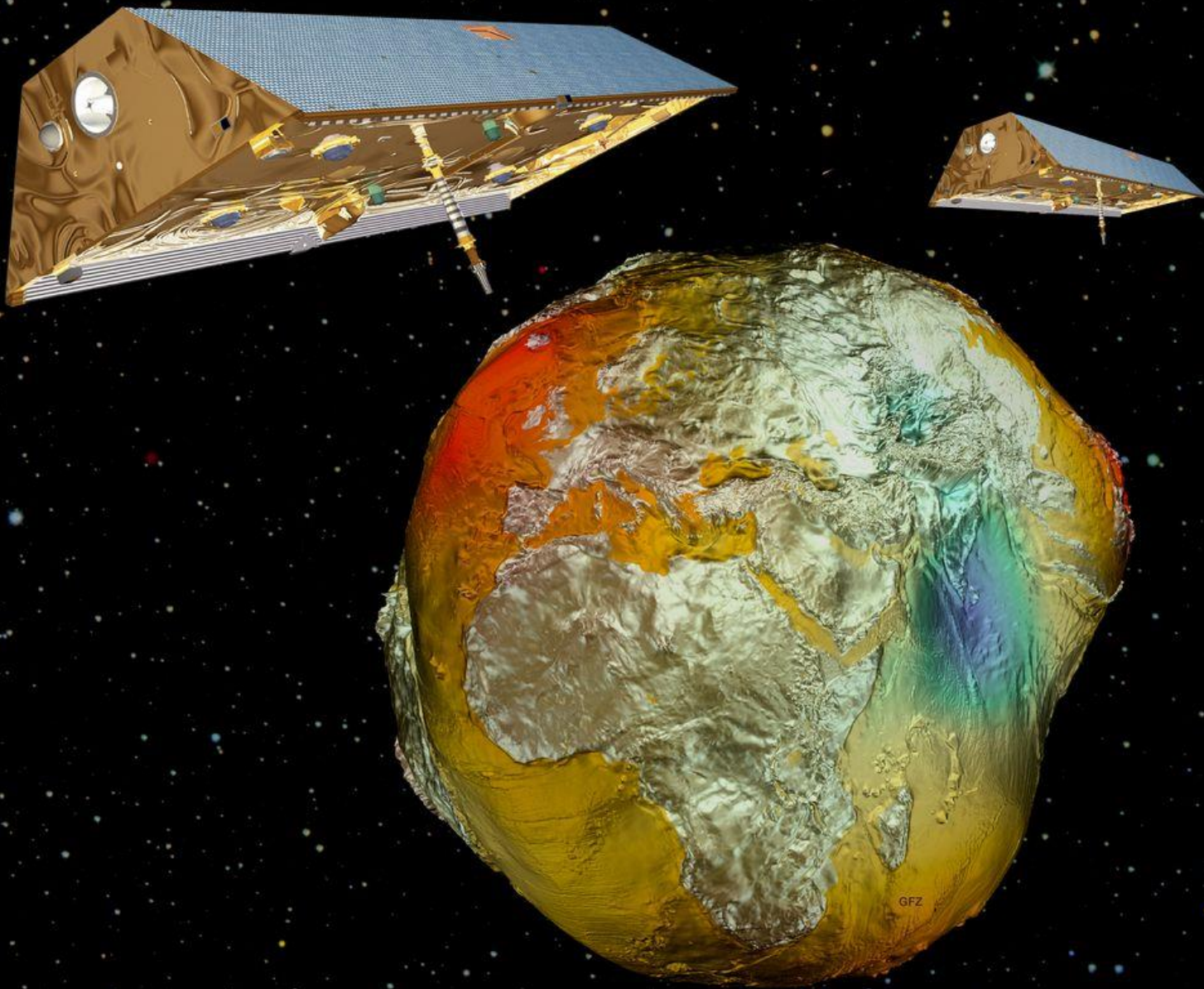
Элемент гидросферы	Объем воды, млн.км ³	Процент
Мировой океан	1338	96,40
Ледники	25,8	1,86
Подземные воды	23,4	1,68
Другие водные объекты	2,8	0,06

Соотношение объемов воды в реках, болотах, атмосфере и организмах (тыс.км³)

■ Реки	2
■ Болота	11
■ Атмосферная влага	13
■ Вода в организмах	1



Спутники GRACE



Каким образом измерение гравитационного поля Земли поможет узнать, насколько весенние паводки могут быть обильными, в своей лекции в «Газете.Ру» рассказывает научный сотрудник ГАИШ МГУ Леонид Зотов. 2013



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 (S.K.Sham), 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.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

2011

УДК 550.8.056, 556

А.А. Бульгин
проф., докт. физ.-мат. наук,
зам. катедры Геологического
факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова
aashu@geophysics.msu.ru

Р.Г. Дикмалов
проф., докт. с.-м. наук, зав.
лаборатории Института
вазых проблем РАН
член-корреспондент РАН
dichmal@iaea.ru

Р.В. Сидоров
к.о. младшего научного
сотрудника, Геофизический
центр РАН
r.sidorov@geos.ru

Использование спутниковой системы GRACE

для мониторинга изменений
водных ресурсов

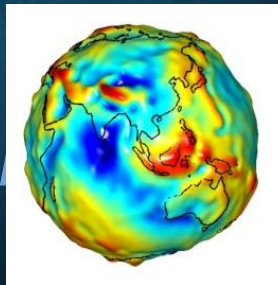
Работы с использованием GRACE в гидрологии ведутся по трем основным направлениям:

- 1-2) исследование изменения TWS и его отдельных составляющих под влиянием хозяйственной деятельности и климата;
- 3) расчет отдельных составляющих водного баланса (осадков, испарения и речного стока);
- 4) ассимиляция данных GRACE в гидрологические модели, их использование при калибровке и валидации моделей.

LOGO

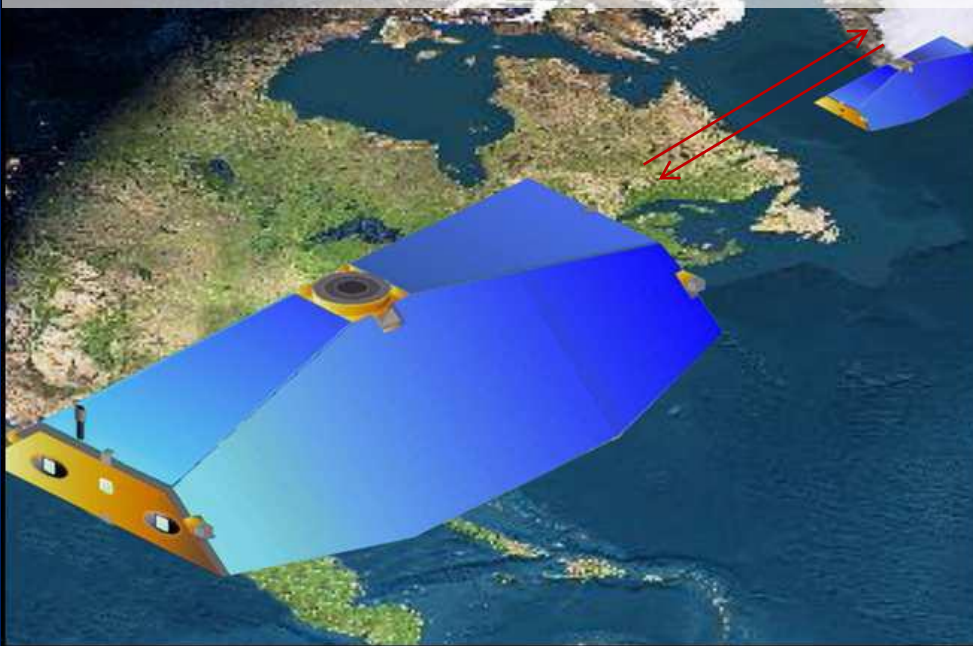


1. Оценка общих влажностных на основе данных GRACE (TWS)

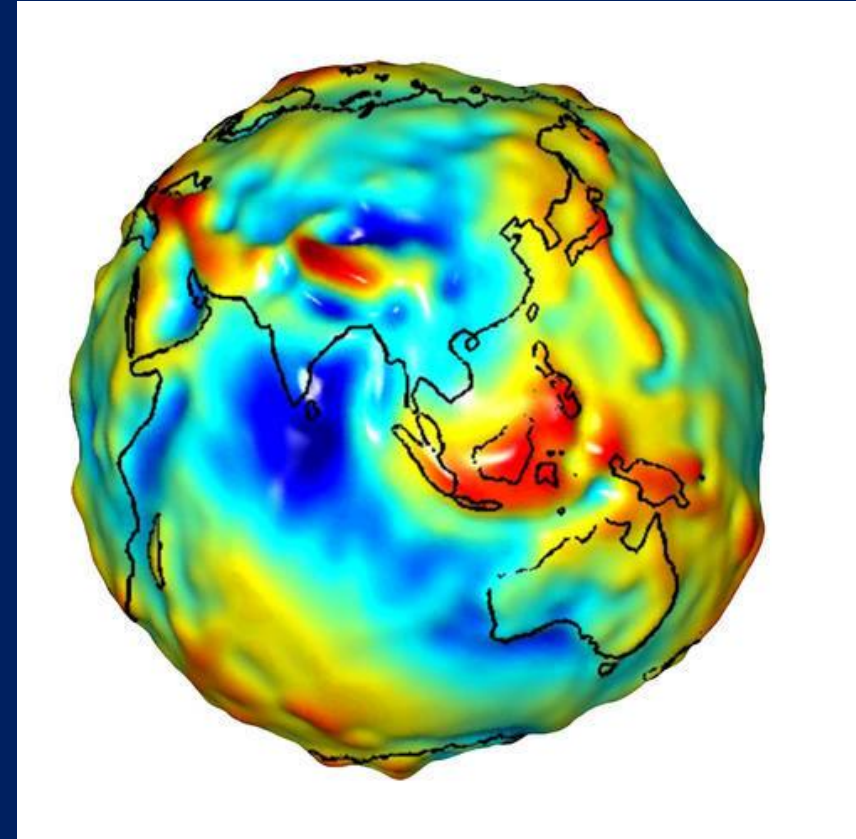


Исследование гравитационного поля Земли: миссия GRACE (2002 - 2017)

- Высота орбиты - 500 км
- Расстояние между двумя спутниками - 220 км
- Период обращения - 96 минут
- Разрешающая способность - 300 км



Временное разрешение: 1 месяц
Пространственное разрешение 300 км

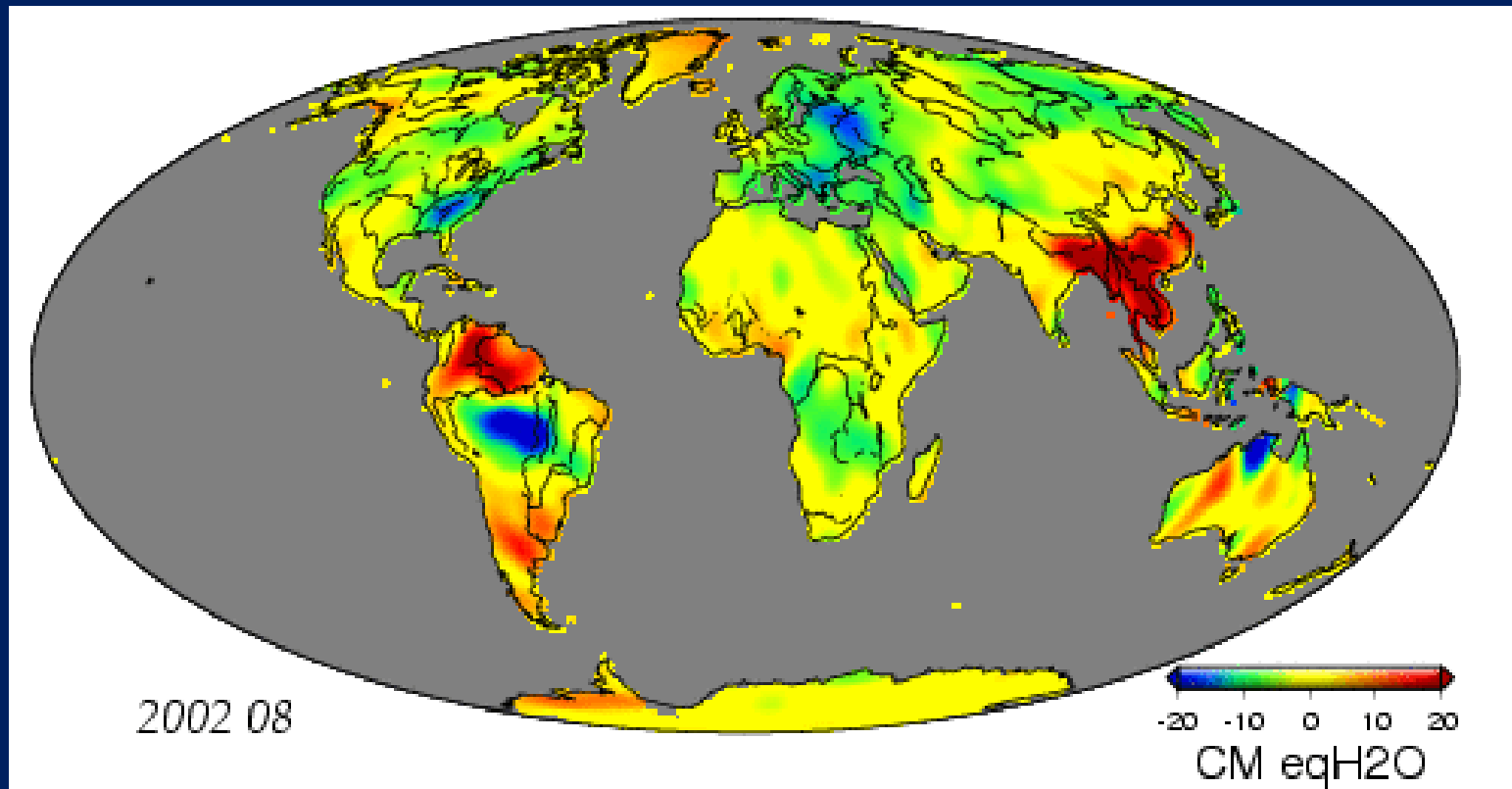


Le Géoïde
99% du signal GRACE
statique

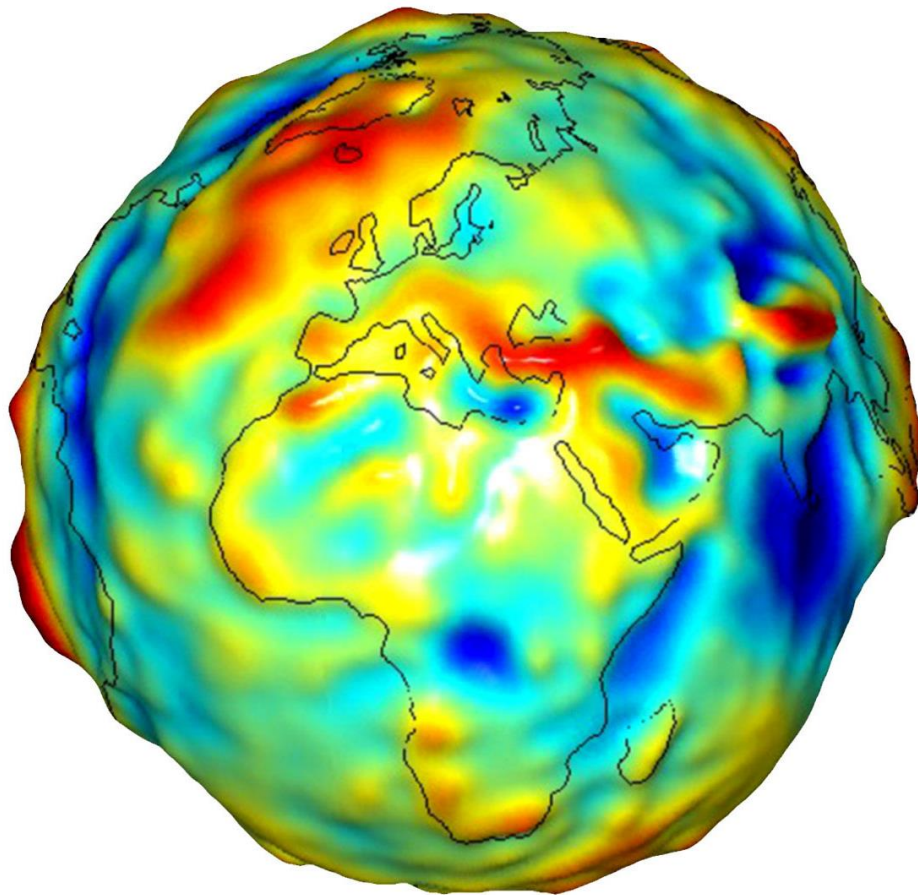
GRACE (2002 – 2017) NASA/DLR

1% du signal GRACE est dynamique

Запущенная в 2002 г. миссия GRACE позволяет получать изменение влагозапасов речных бассейнов (TWS) в пространственном разрешении 100-300 км и временном одного месяца. Ошибка для площадей порядка 10^5 км² составляет 3-4 см и 1-2 см для площадей порядка 10^6 км².



Задачи проекта *GRACE*



- Уточнение параметров гравитационного поля
- Построение гравитационных моделей Земли
- Исследование геодинамических процессов
- Изучение динамики уровня океана, влажности почвы, изменений уровня грунтовых вод, таяния ледников.
- Оценка водных ресурсов и их изменений для крупных речных бассейнов

Миссия GRACE

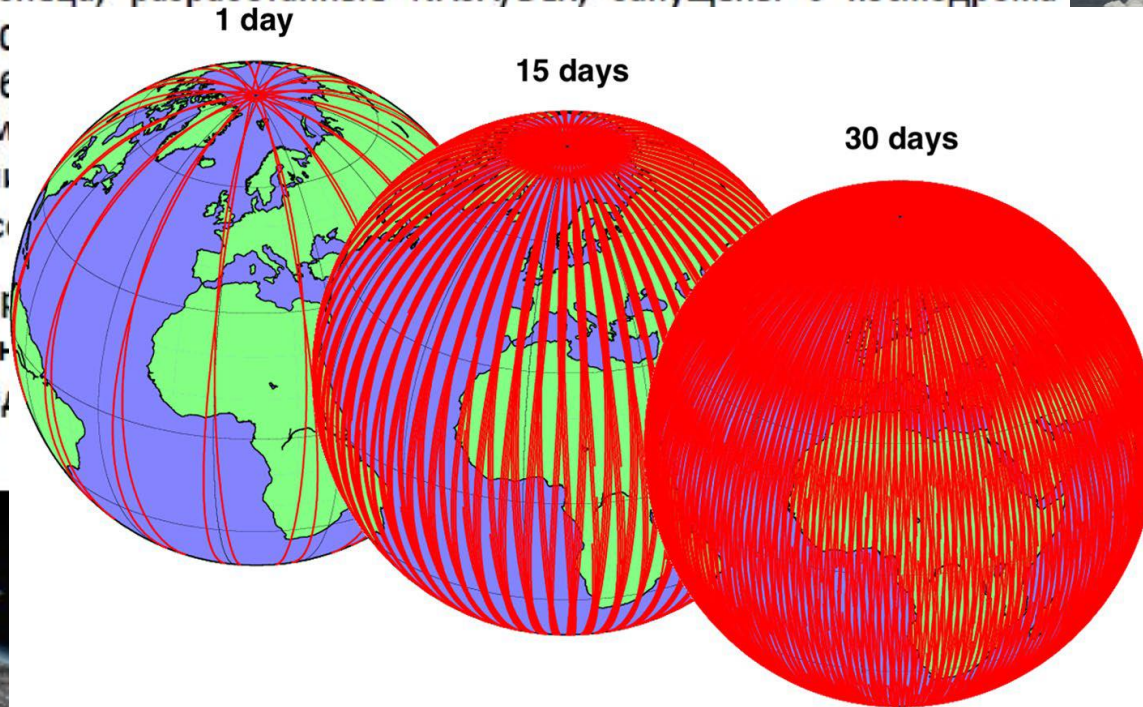
Миссии по исследованию гравитационного поля

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

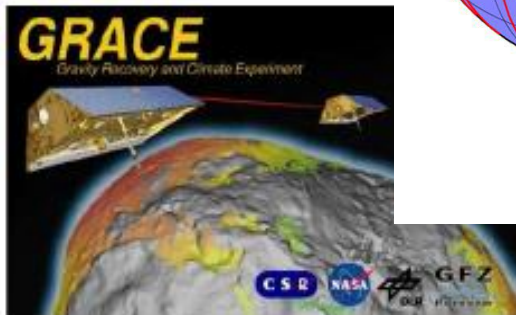
GRACE - эксперимент по исследованию гравитационного поля и климата,
два спутника – близнеца, разработанные NASA/DLR, запущены с космодрома
Плесецк 17 марта 2002 г.

по околополярной орбите.
Основными измеряемыми параметрами являются изменения под влиянием гравитационных и магнитных полей.

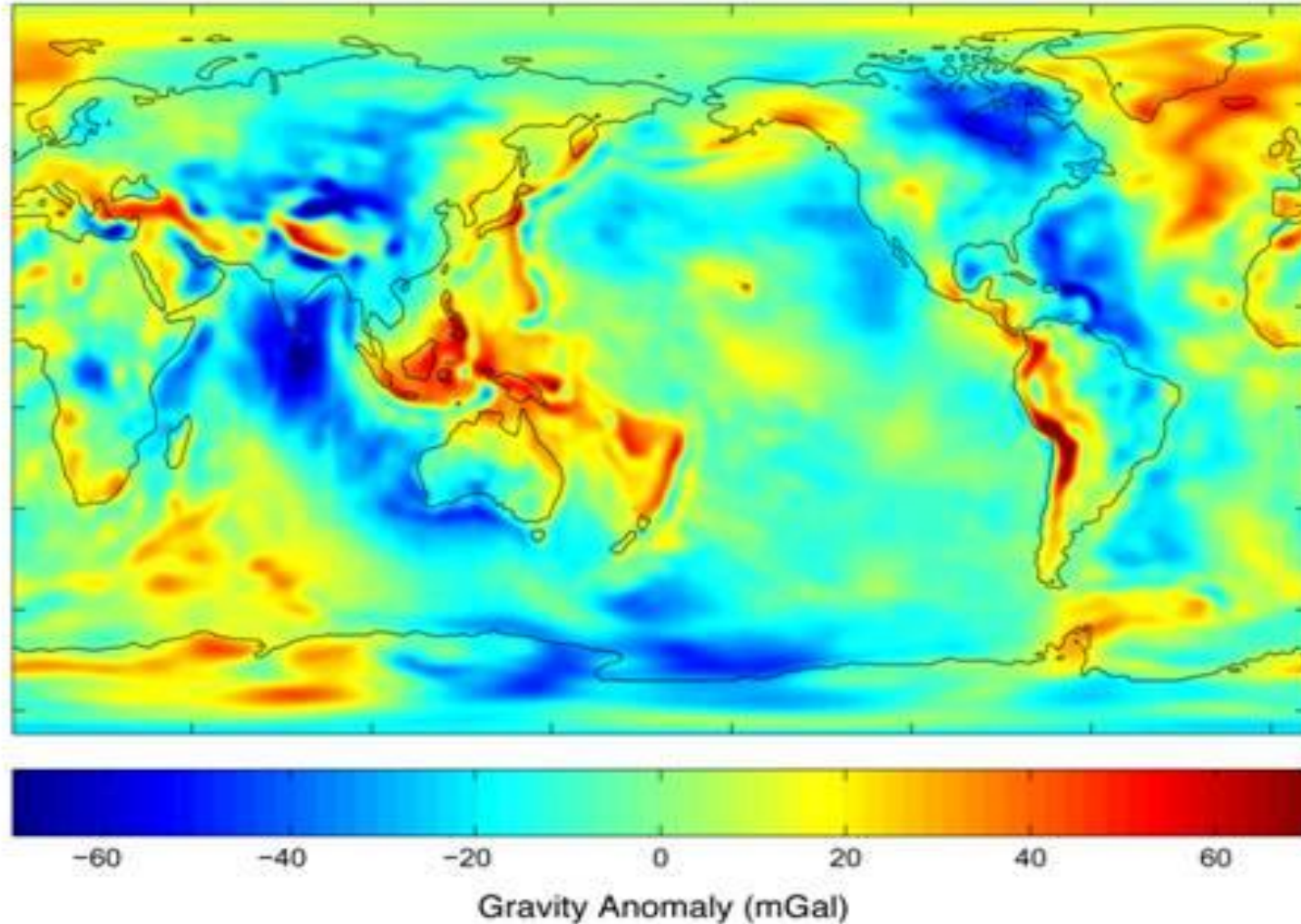
GOCE - запущен в марте 2009 г. с целью получения высокоточных данных о гравитационном поле Земли.
градиентометра. Ожидается разрешение 100 км.



GRACE FO - совместная американско-германская космическая миссия по отслеживанию непрерывного изменения воды и других изменений массы Земли
успешно запущена
22 мая 2018 года



Earth gravity field model GRACE (GGM03s)



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

Пропуски в рядах

Level-2 (JPL)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2002				1	2			3	4	5	6	7
2003	8	9	10	11	12		13	14	15	16	17	18
2004	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
2005	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
2006	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
2007	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
2008	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
2009	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
2010	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
2011		103	104	105	106		107	108	109	110	111	112
2012	113	114	115	116		117	118	119	120		121	122
2013	123	124		125	126	127	128			129	130	131
2014	132		133	134	135	136		137	138	139	140	
2015	141	142	143	144	145		146	147	148			149
2016	150	151	152		153	154	155	156			157*+	158*+
2017	159*+		160*+	161*+	162*	163*+						
2018						1*+	2*+			3*+	4+	5+
2019	6+	7*+	8+	9+	10+	11+	12+	13+	14+	15+	16+	17+
2020	18+*	19+*	20+	21+	22+	23+	24+	25+	26+	27+	28+	29+
2021	30+	31+	32+	33+	34+	35+	36+	37+	38+	39+	40+	41+
2022	42+	43+	44+	45+	46+	47+	48+	49+	50+			

GRACE

- Level-3 products
- no Level-3 products available

GRACE-FO

- Level-3 products available

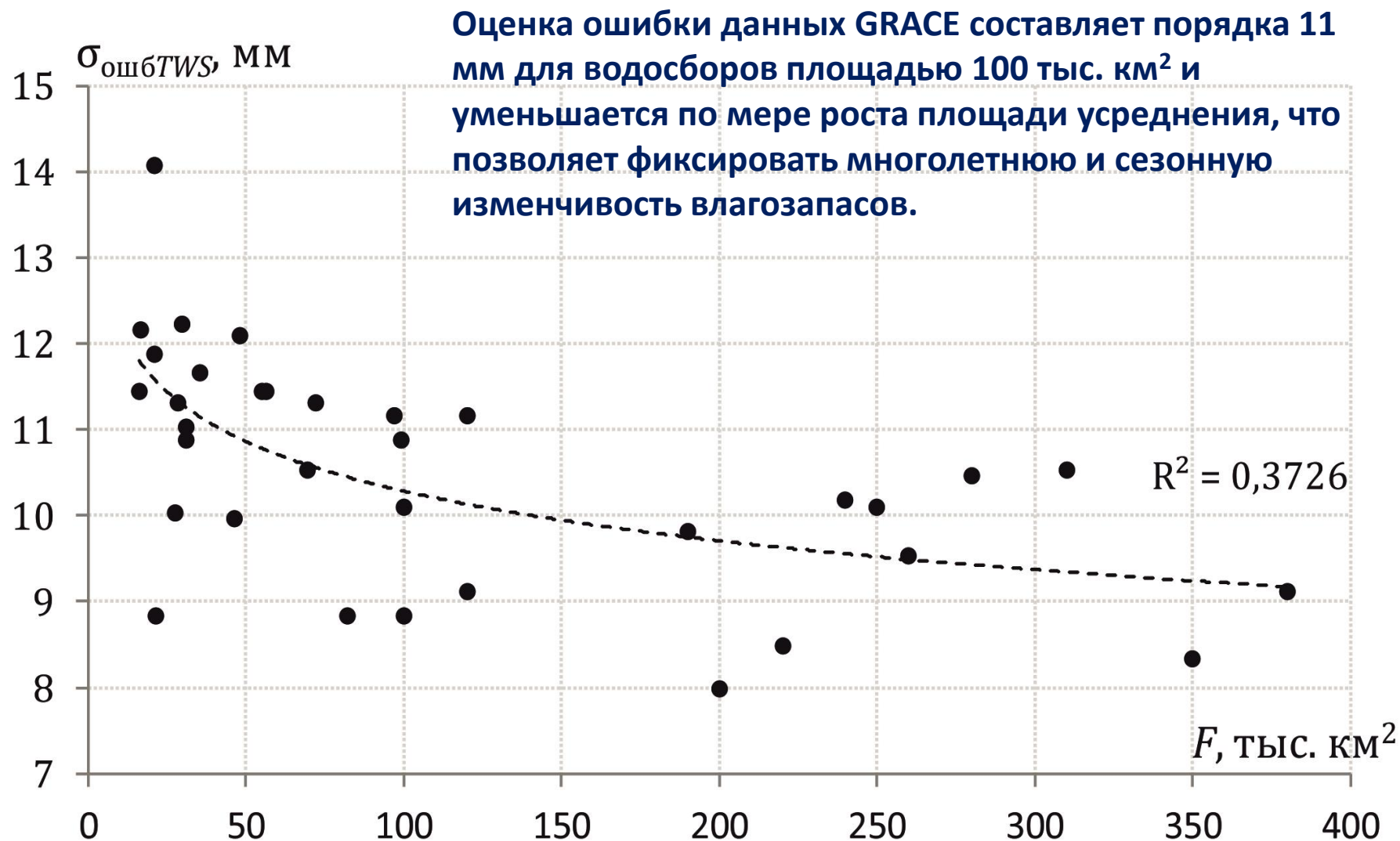
Current Level-2 Release: RL06

- + Level-3 products (with ACC transplant)
- * partial / overlapping cal-months

Table 4: GRACE and GRACE-FO Level-3 product availability

Доступные данные с апреля 2002 г. по настоящее время. Однако, в силу ряда технических причин, за отдельные месяцы данных о влагозапасах отсутствуют. С июля 2017 г. по май 2018 г. данные отсутствовали в силу того, что спутники не функционировали. Данные за 2017 г. отличаются пониженной точностью.

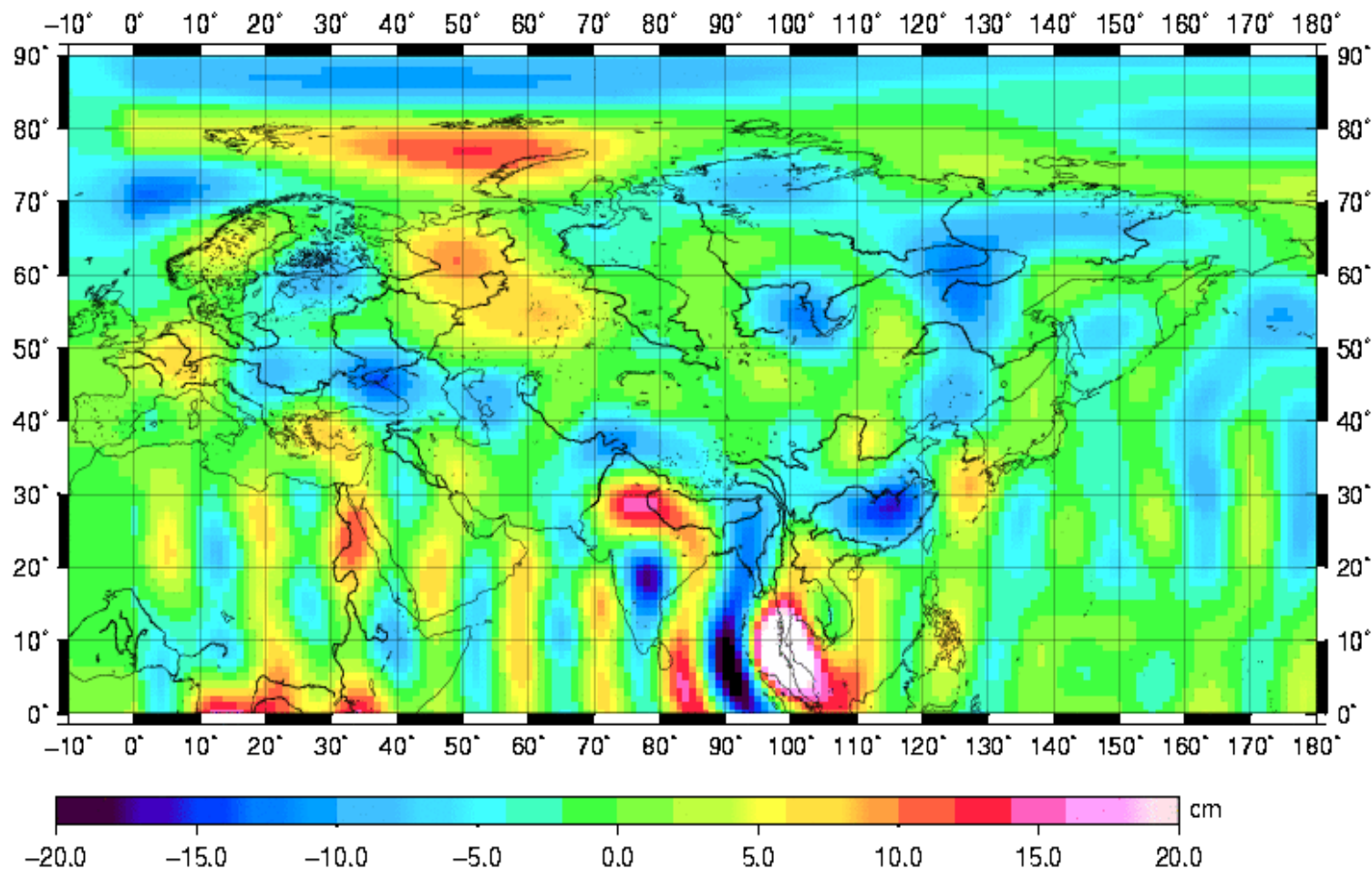
Зависимость ошибки определения слоя влагозапасов от площади водосбора*, ст



**По УВБ холодного периода*

Карты аномалий гравитационного поля

Sum PC 1-10 2003/01

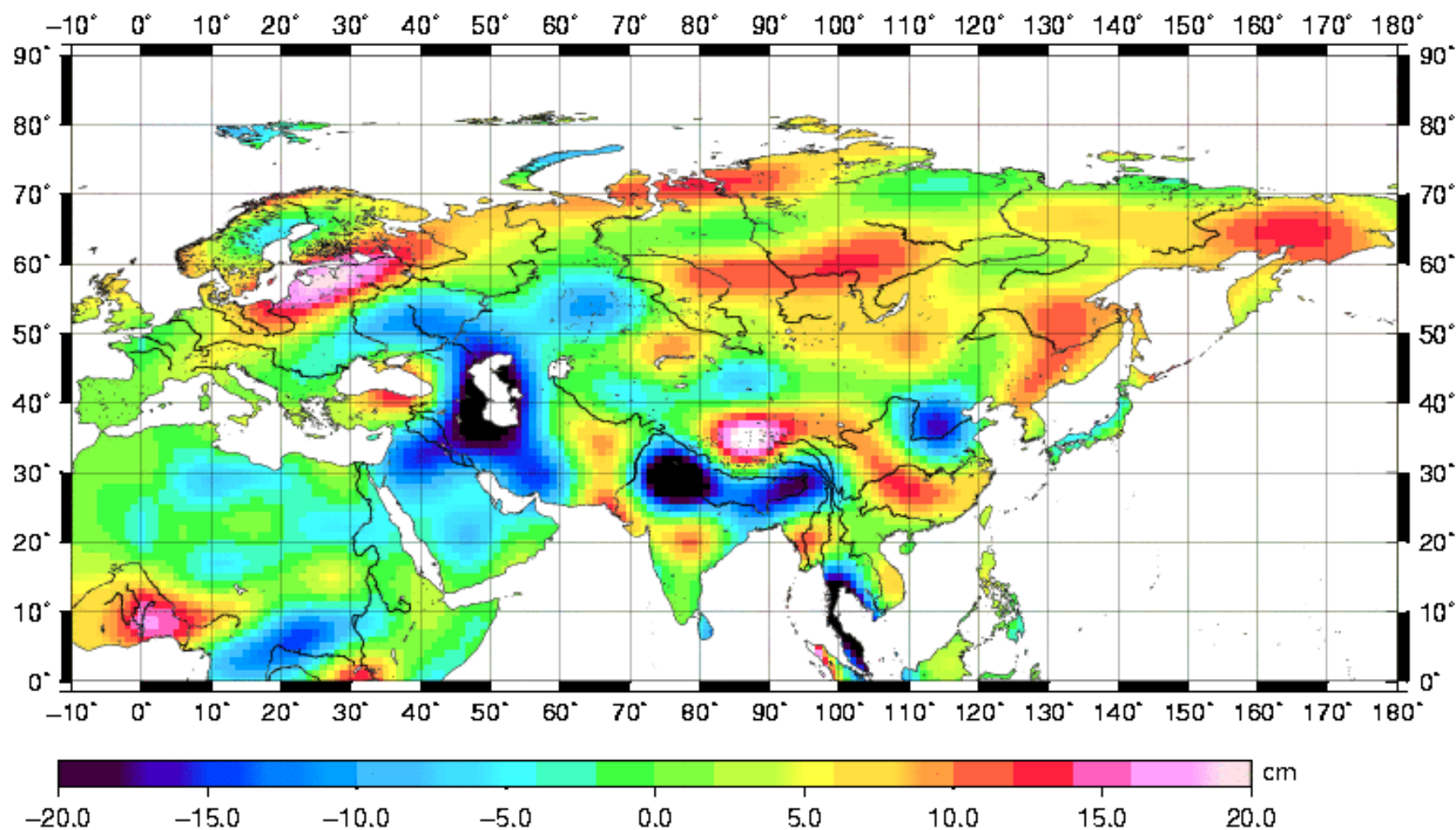


processed by L. Zotov

Улучшенное разделение различных компонентов сигнала позволило уловить гидрологические сезонные изменения.

Динамика влагозапасов за 2003-2016 гг.

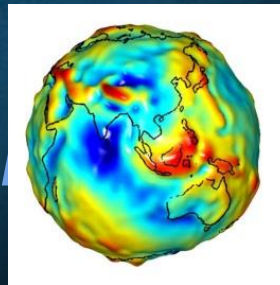
2016-2003



processed by L. Zotov

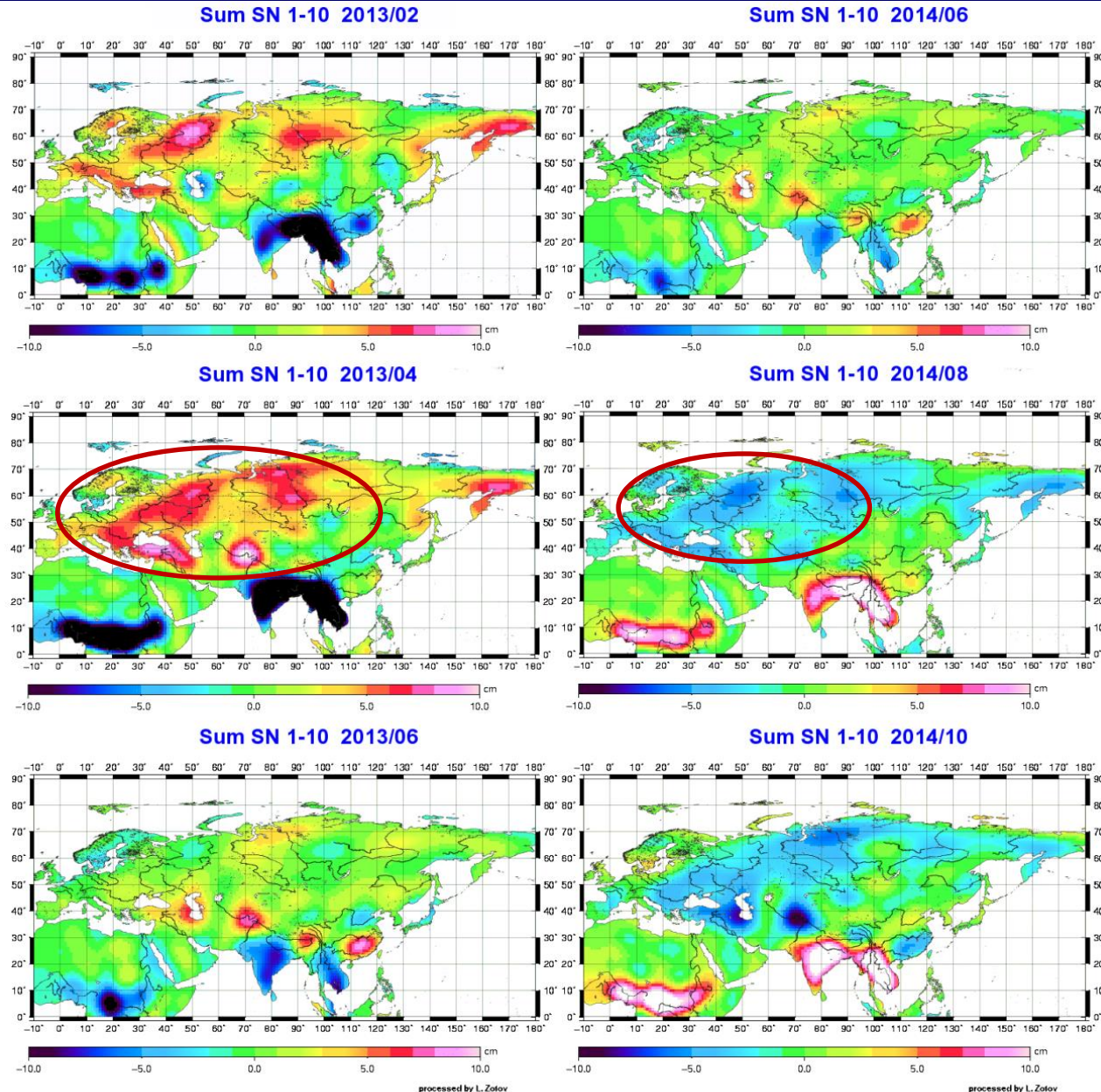


2. Оценка аномалий гравитационного поля, полученных по данным GRACE, для речных бассейнов России

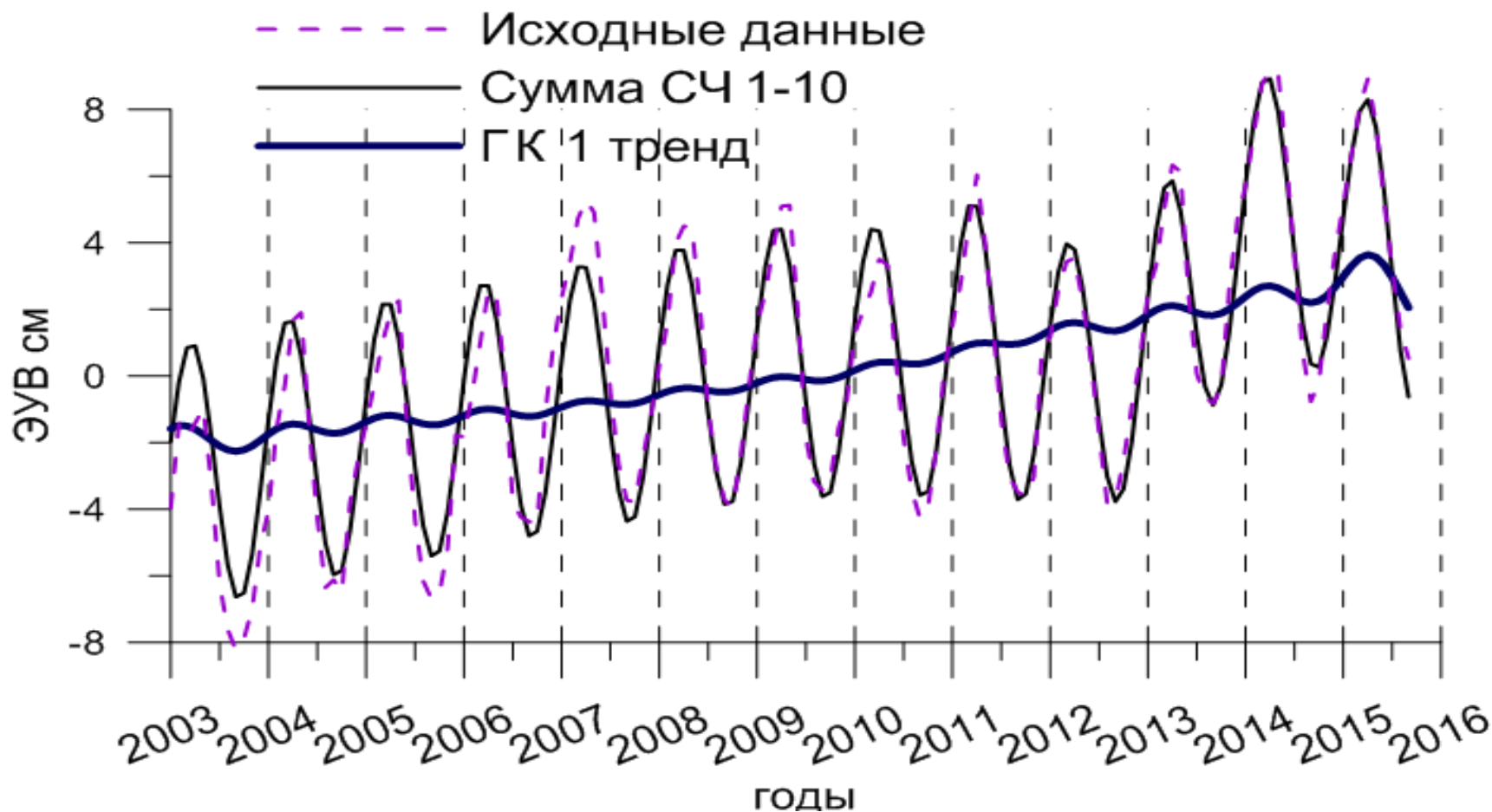


Карты аномалий гравитационного поля

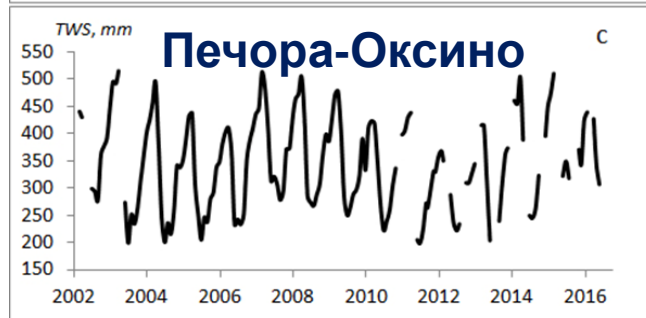
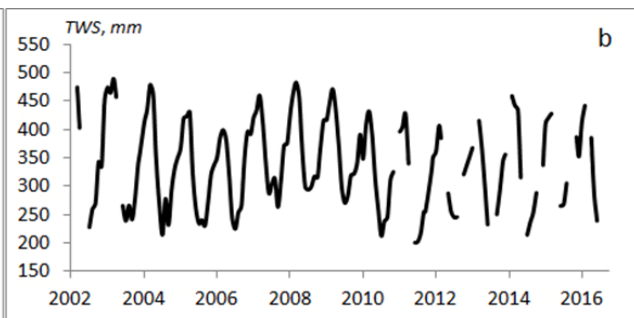
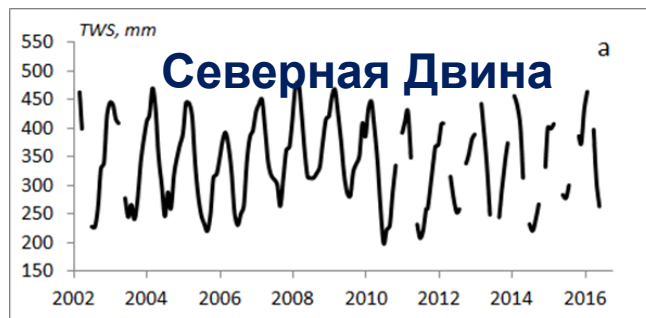
Ежемесячные карты
ГК 1 (годовой цикл)
для февраля, апреля,
июня 2013 и июня,
августа, октября 2014.
Виден избыток масс
весной 2013 и
недостаток
осенью 2014.



Средние изменения алогозапасов в бассейнах 15 крупных рек России



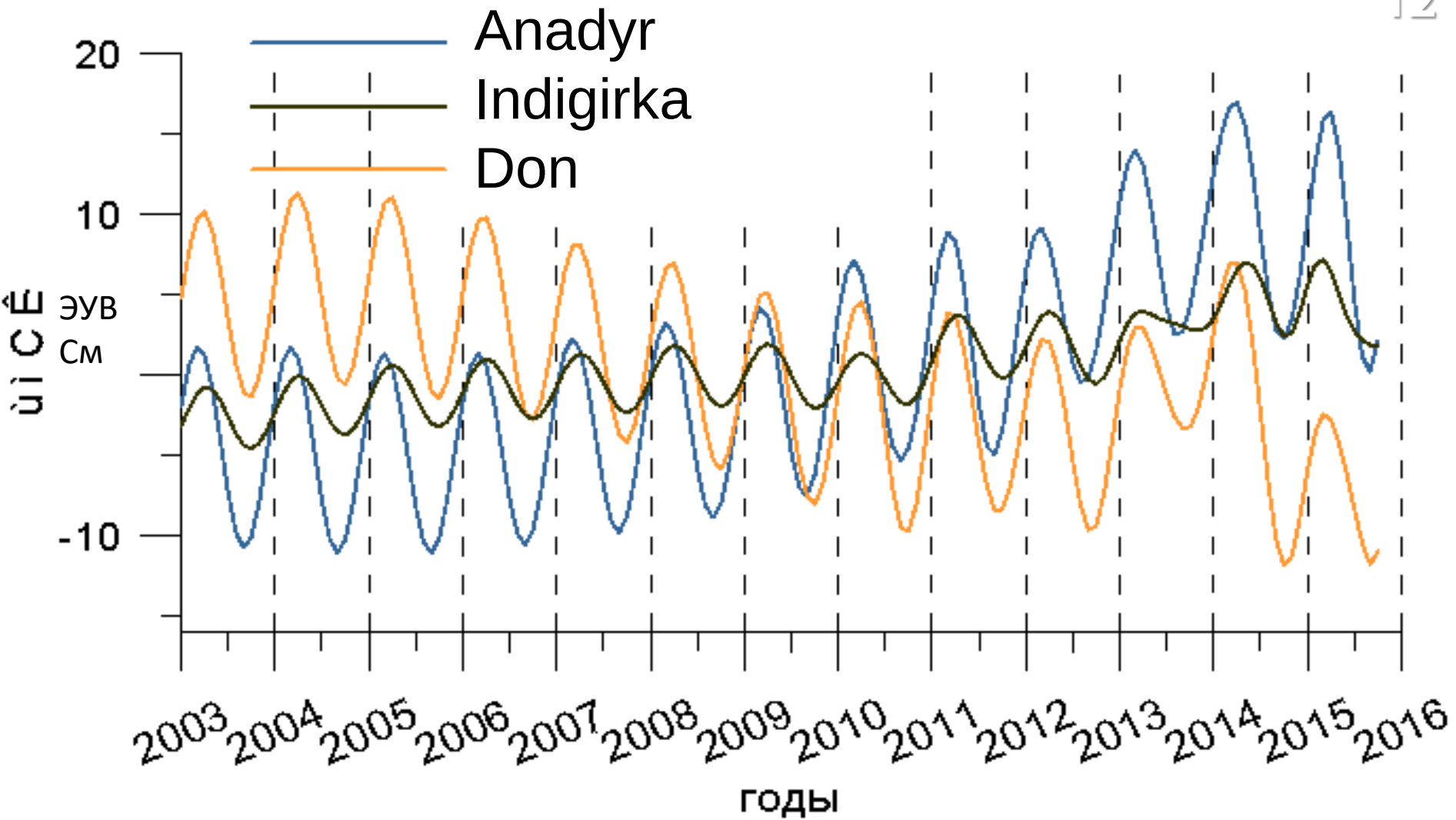
Initial data
Sum SN 1-10
PC 1 trend



**Изменение
месячных
влагозапасов
для
крупнейших
бассейнов ЕТР**

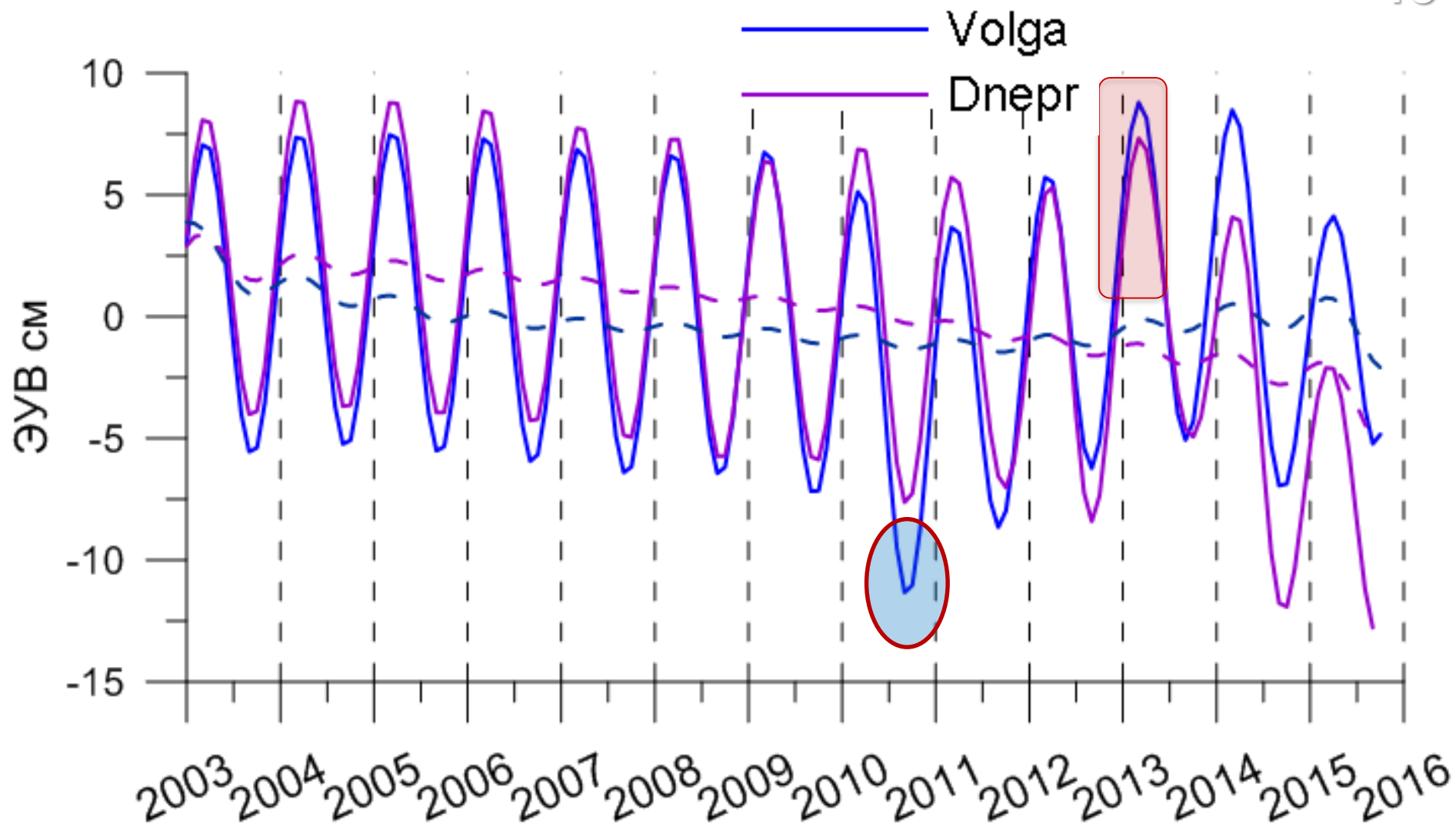
Изменения гравитационного поля в бассейнах крупных рек Сибири и ЕТР

12



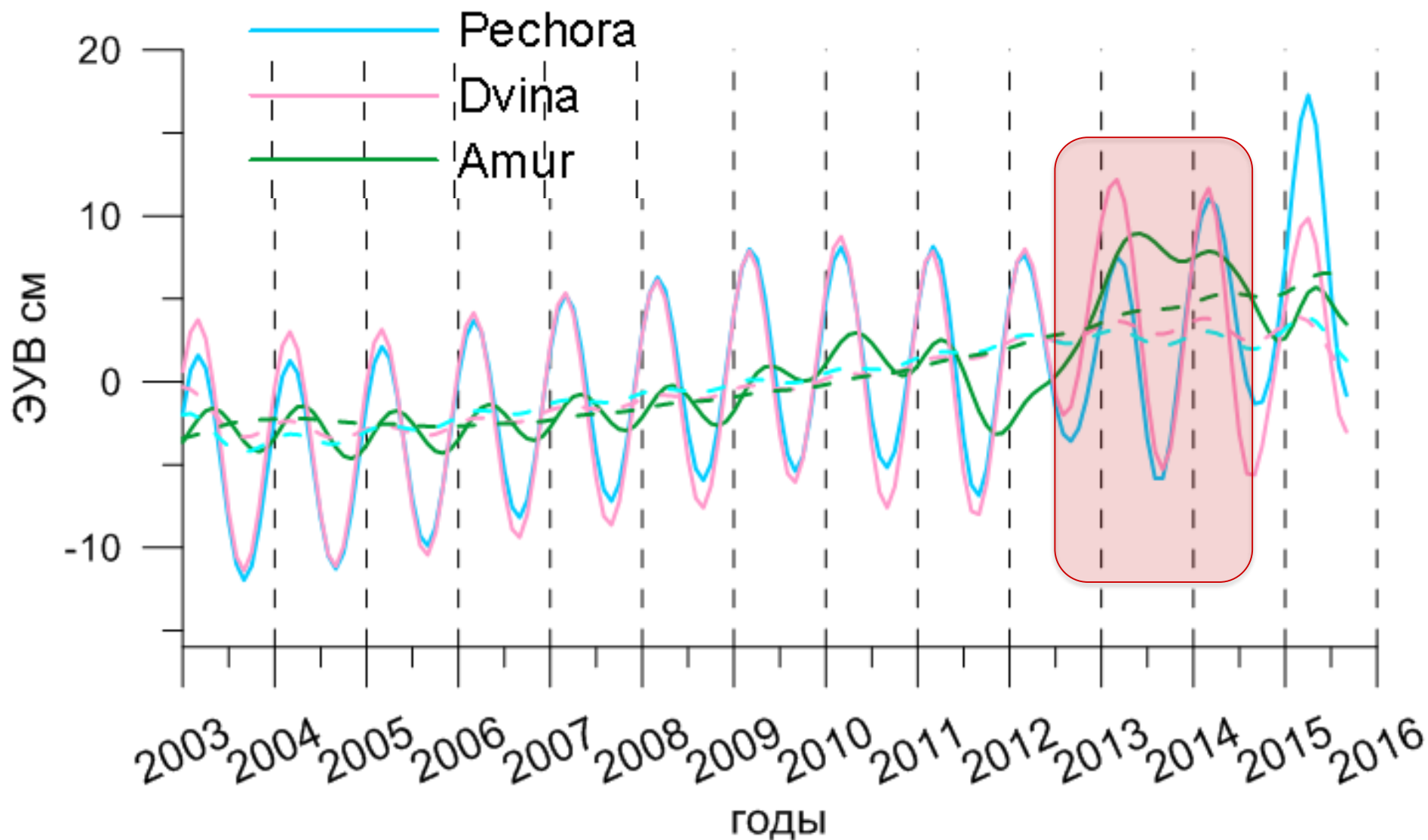
Изменения гравитационного поля в бассейнах рек ЕТР

13

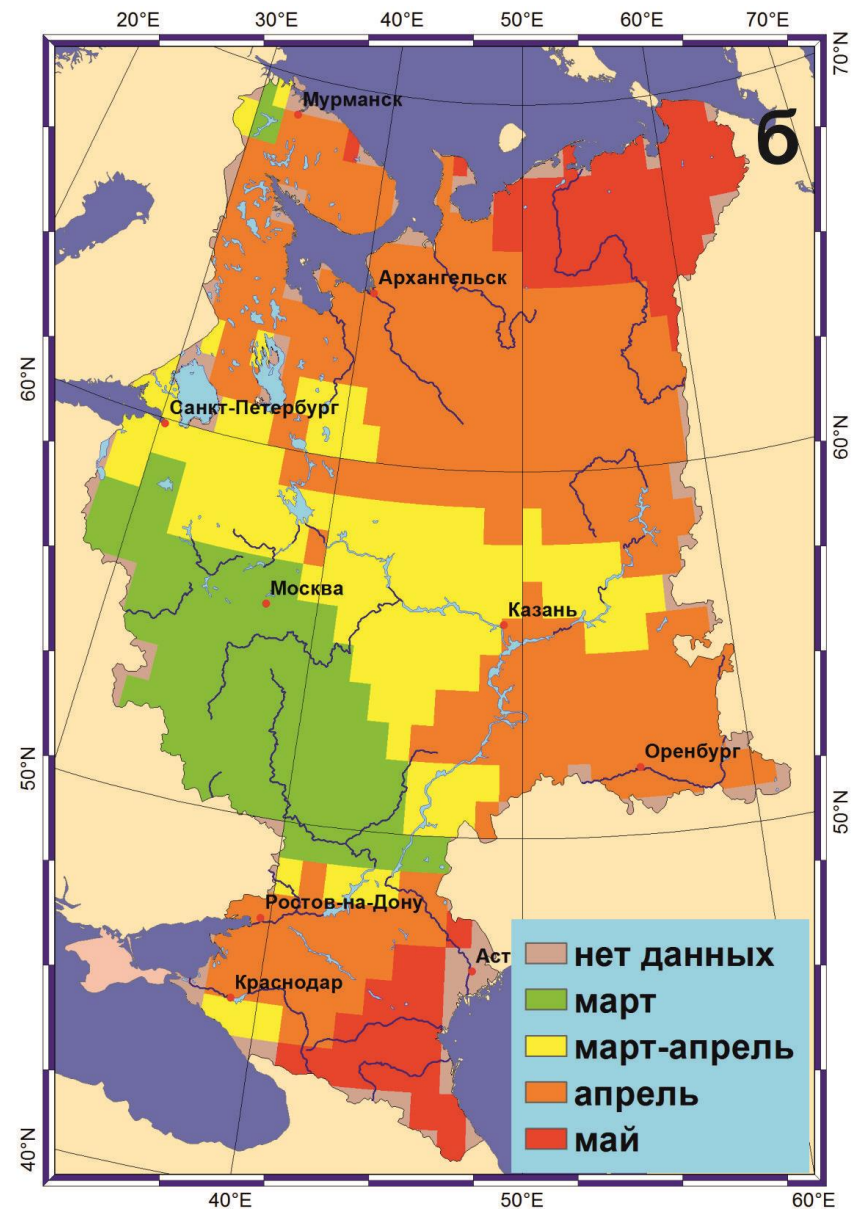
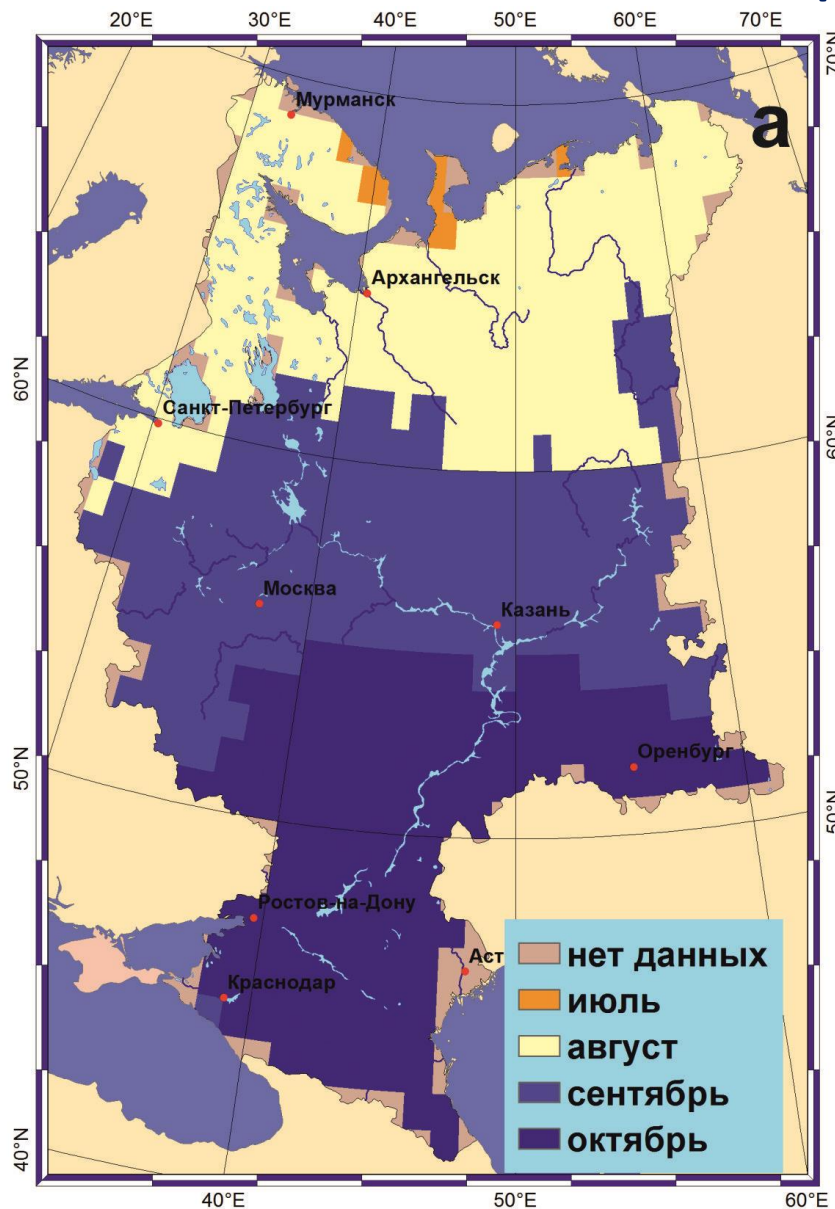


Изменения гравитационного поля в бассейнах рек севера ЕТР и Амура

14



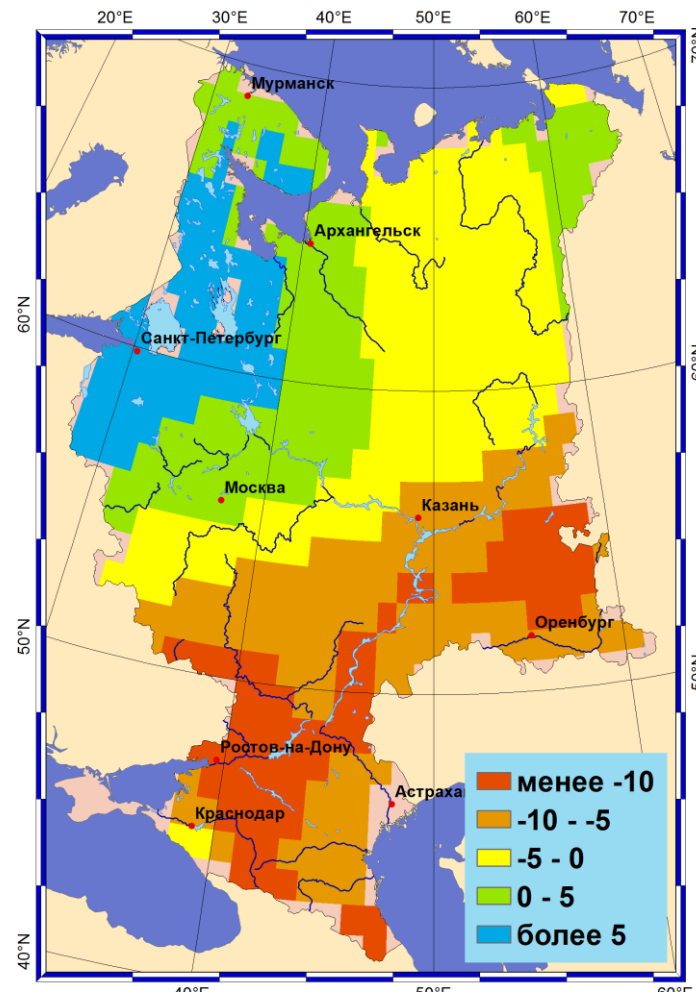
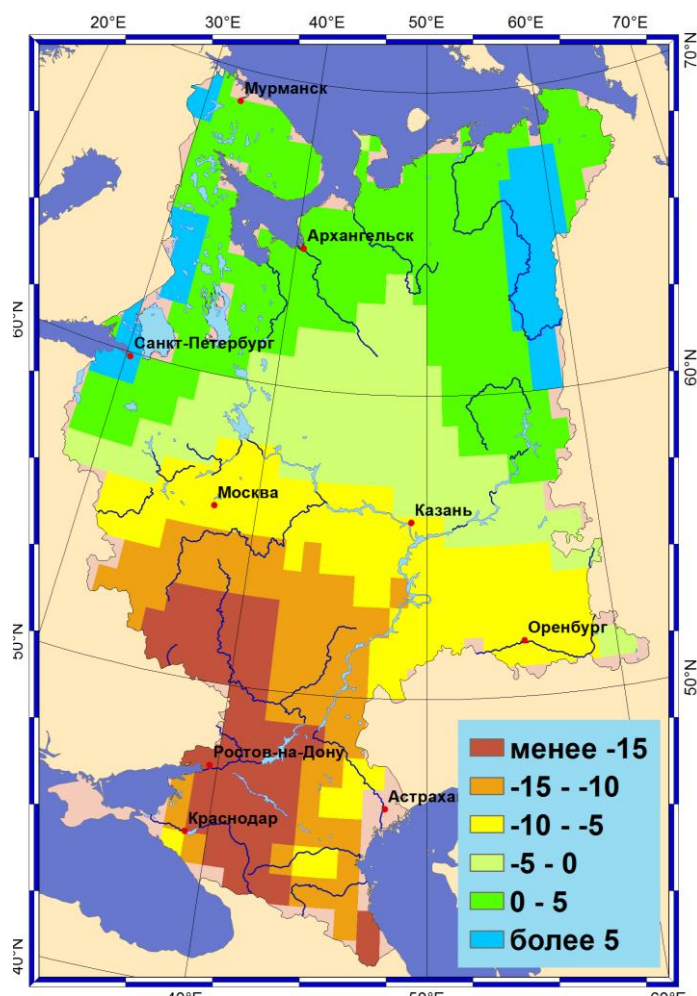
Сезонный ход влагозапасов



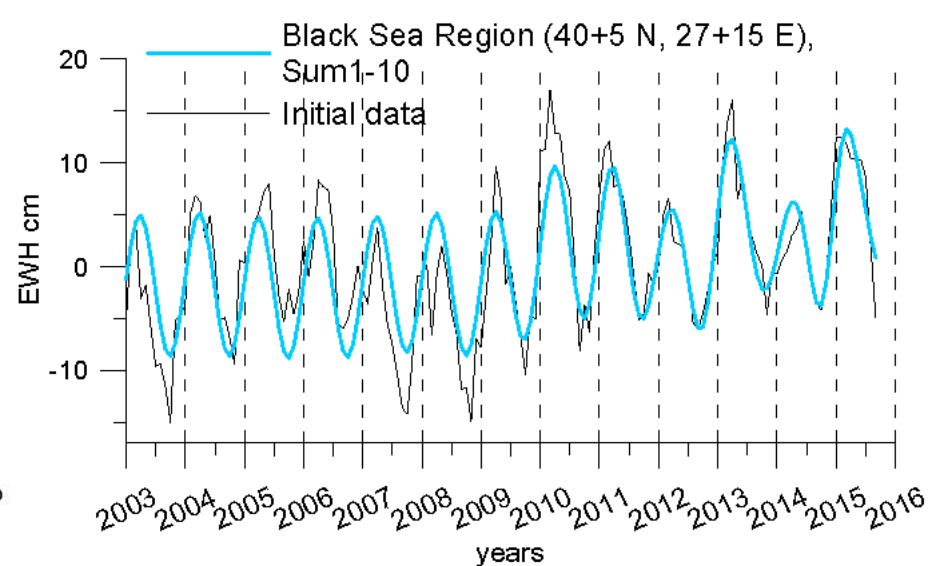
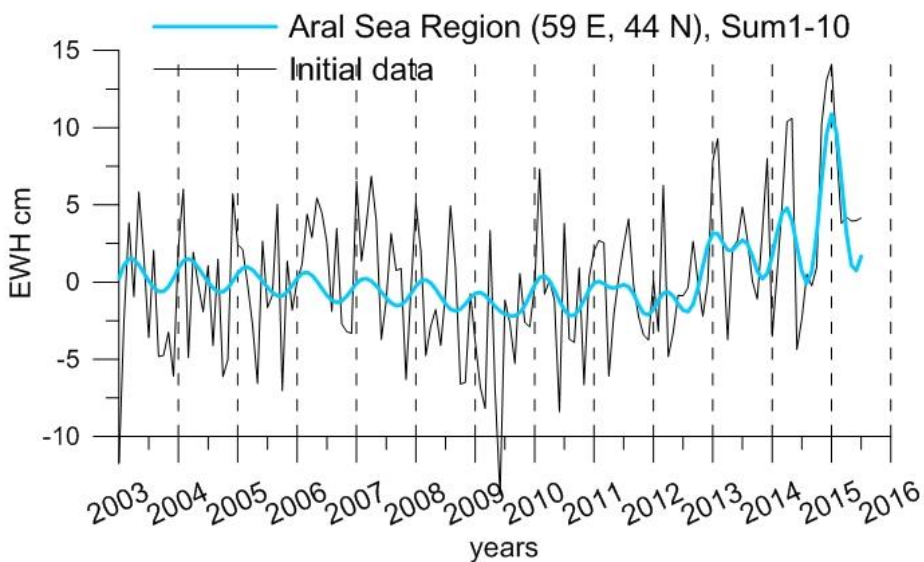
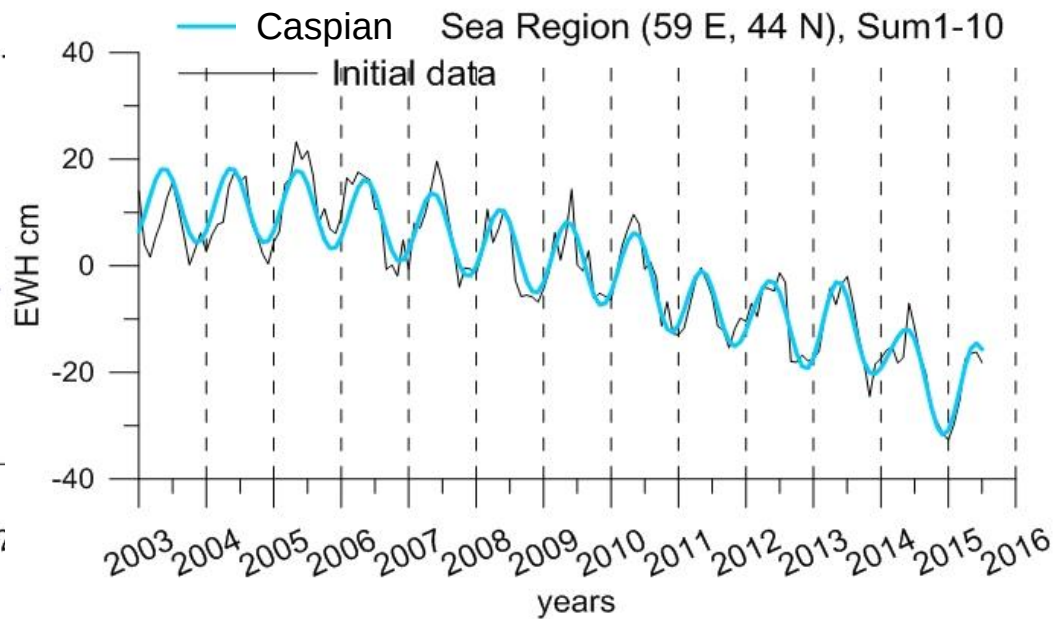
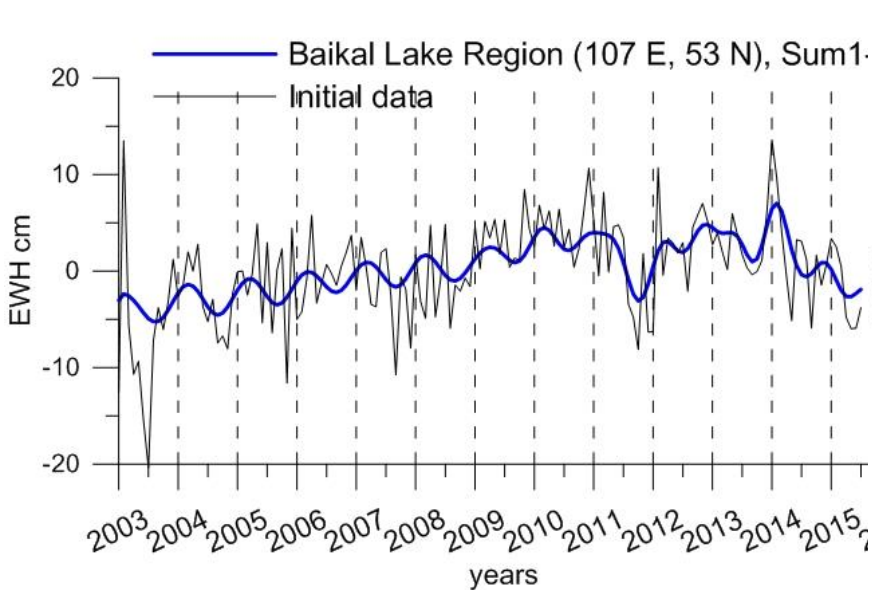
Месяц минимальных влагозапасов (а) и максимальных (б)

Динамика бассейновых влагозапасов за 2002-2015 гг.

Изменение минимальных (слева)
и максимальных (справа) за год **общих влагозапасов**, мм/год



Изменение влагозапасов для Байкальского региона, Каспия, Арала и Черного моря



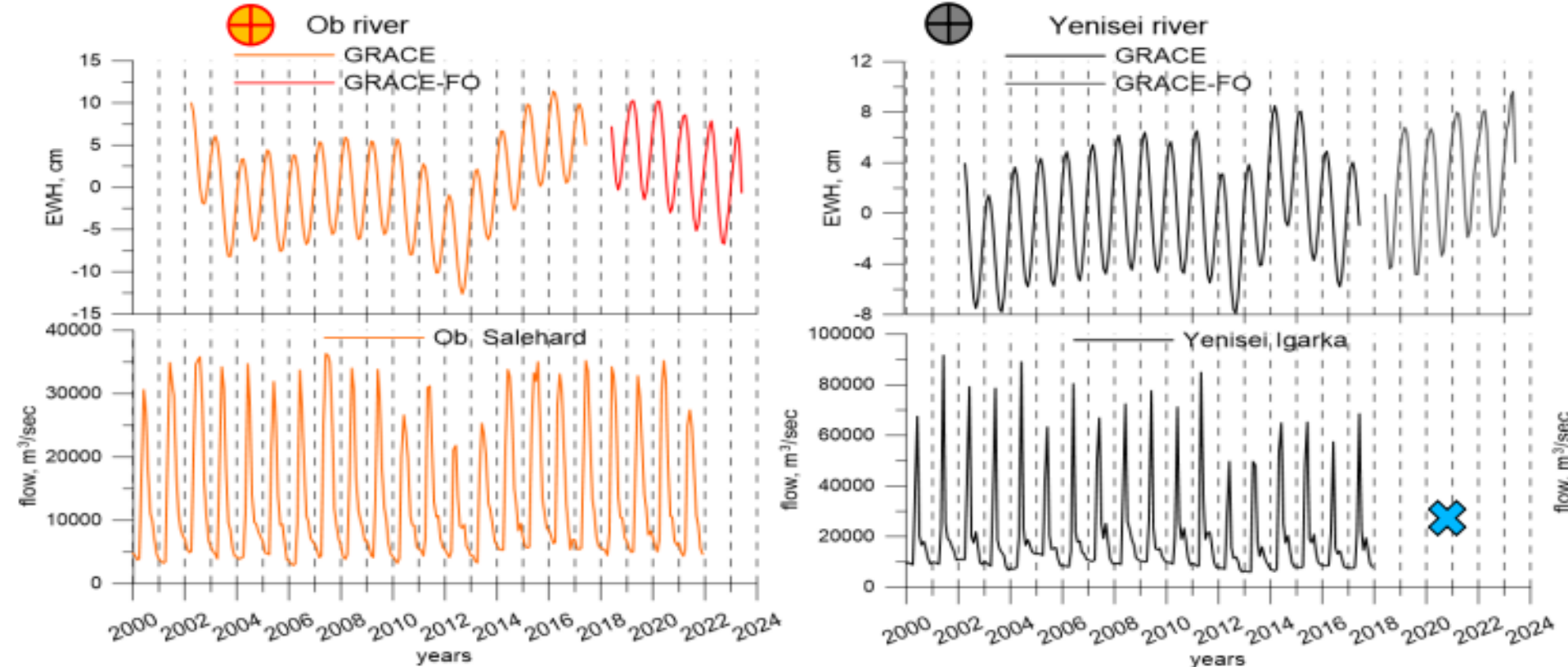
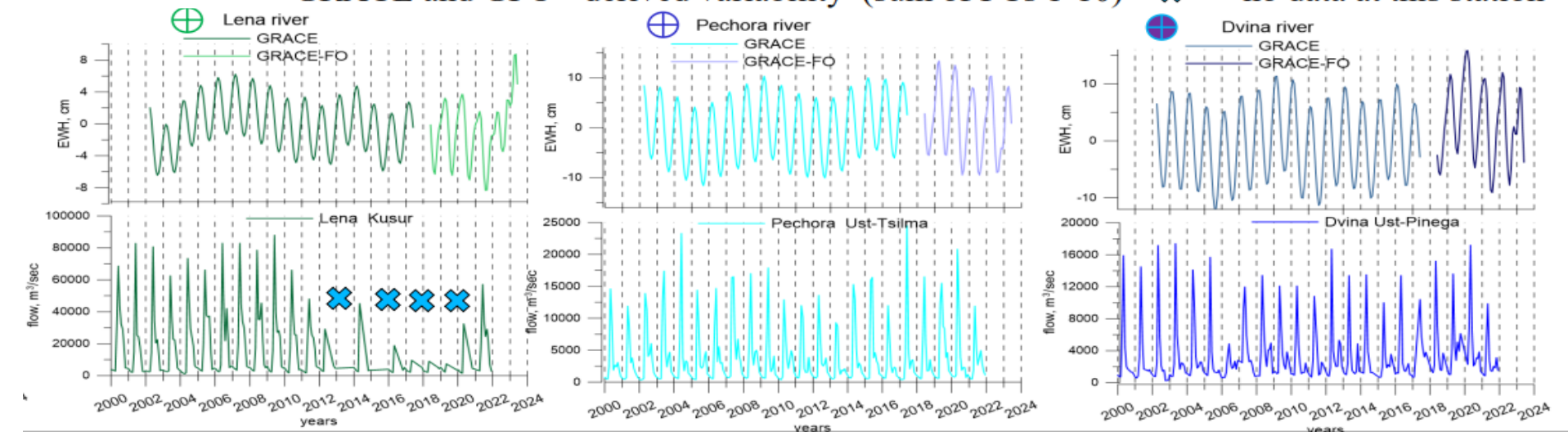
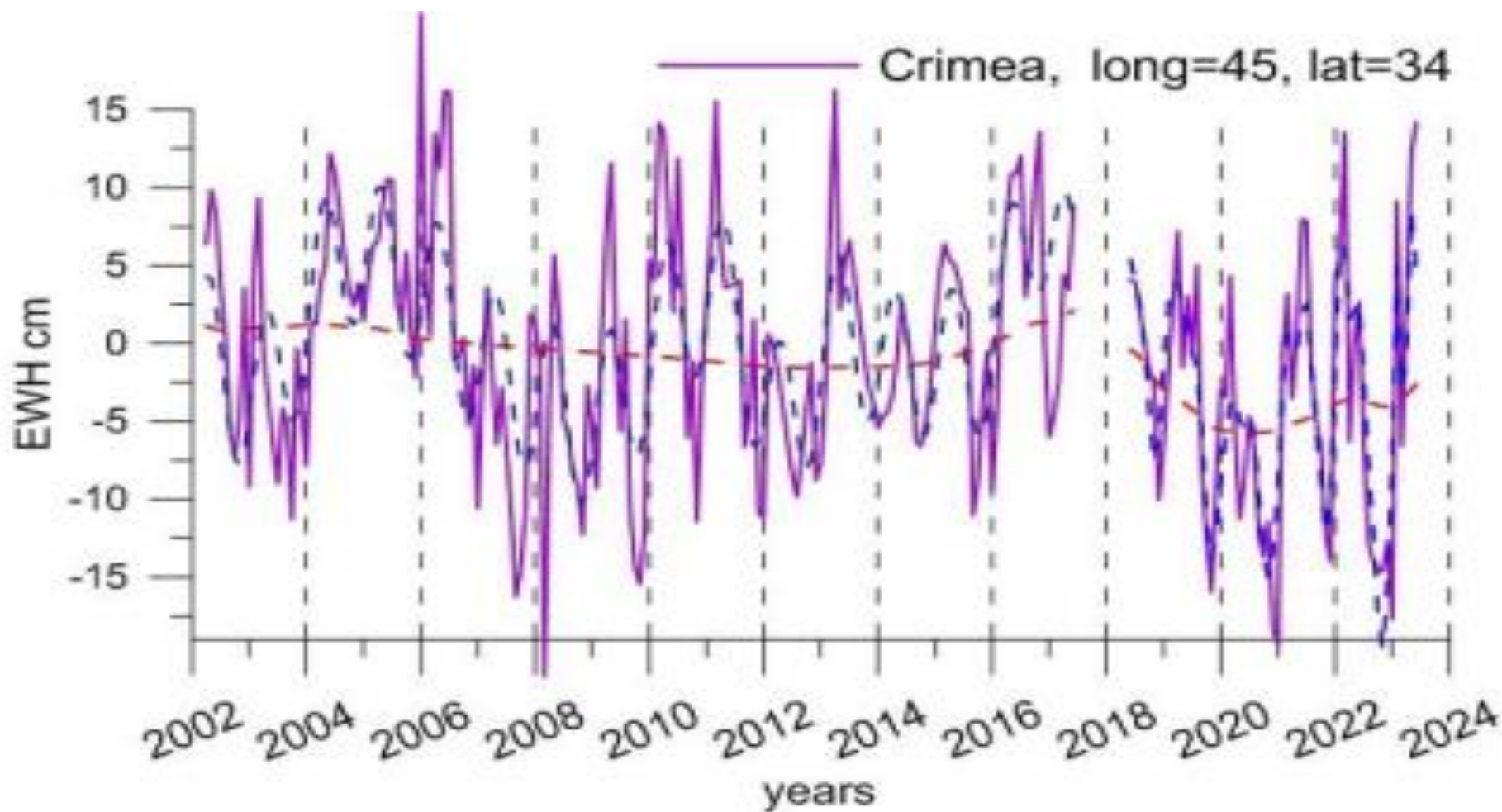


Fig 7. ↓ Comparison of changes of the large Russian river's flows since 2000 with GRACE and GFO - derived variability (sum of PCs 1-10) ✕ - no data at this station

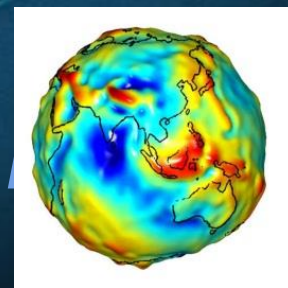


Изменение влагозапасов для Крыма





3. Применение спутниковой системы GRACE для оценки характеристик водного баланса



Уравнение водного баланса

$$\Delta TWS = \Delta SW + \Delta(P-E) + \Delta SN + \Delta TSS - \Delta R,$$

where **ΔTWS – measured by GRACE**

ΔSW – changes in lakes and swamps

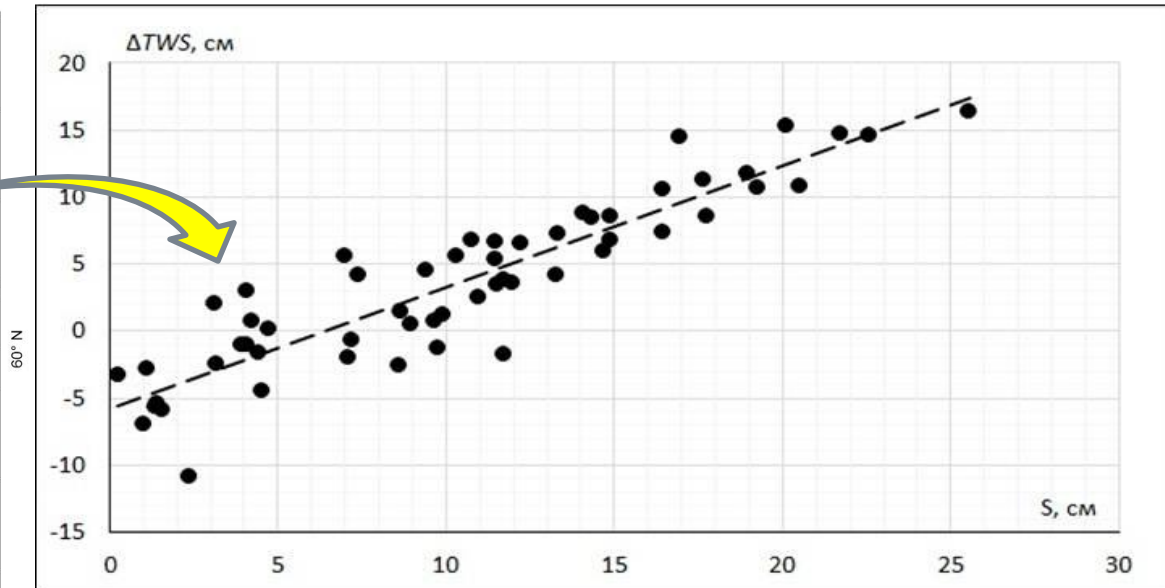
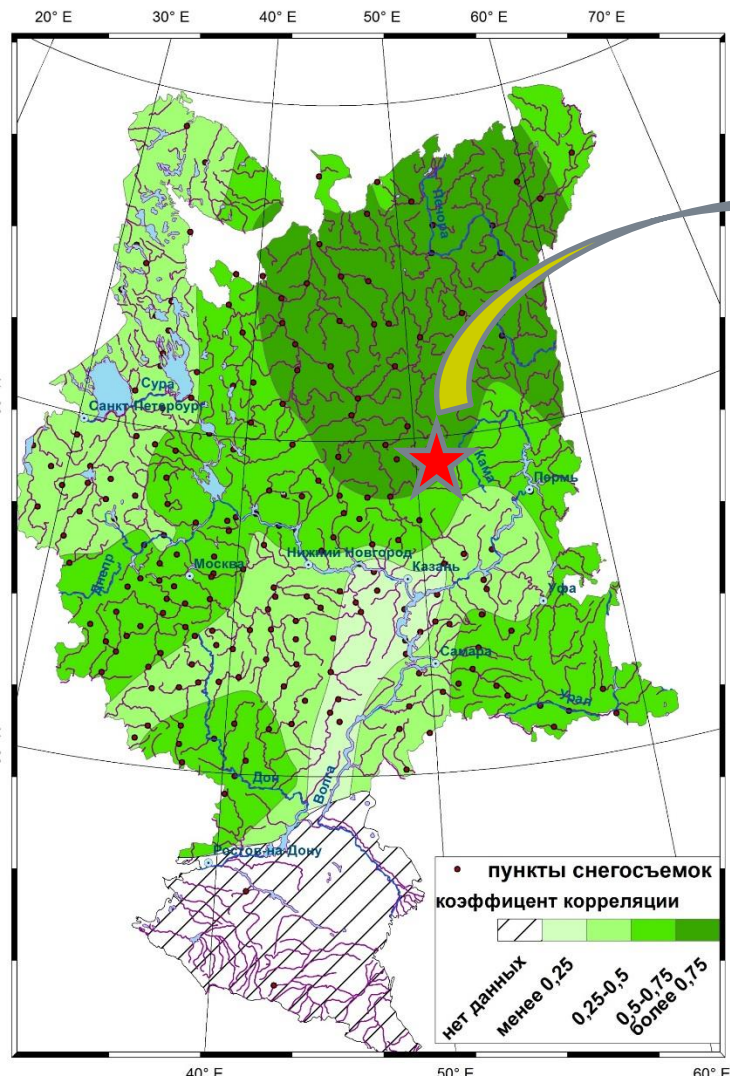
$\Delta(P-E)$ – changes of precipitation–evaporation difference

ΔSN – snow cover storage changes

ΔTSS – ground water storage changes

ΔR – river discharge changes

Возможность использования данных GRACE для оценки характеристик снежного покрова



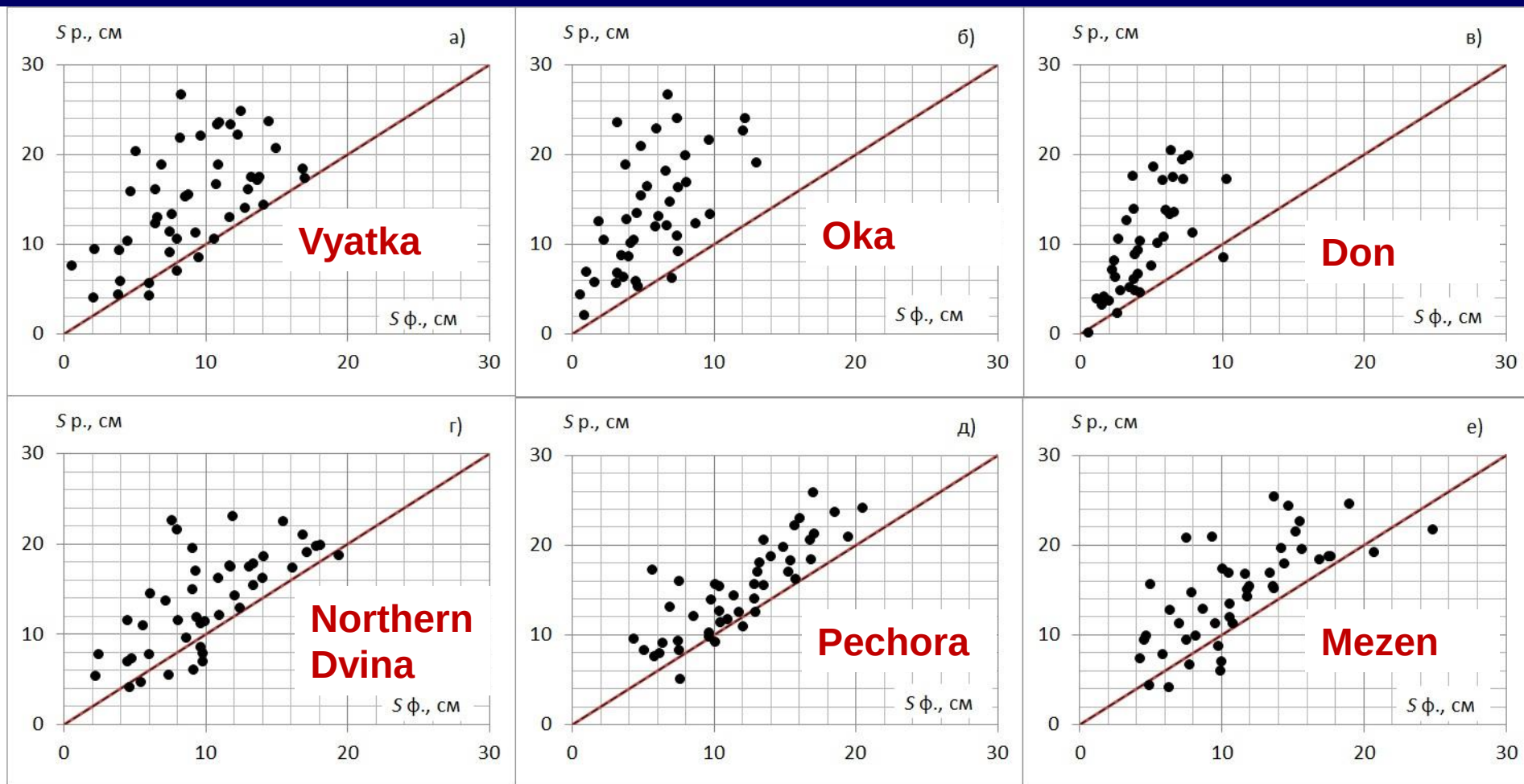
Correlation of ΔTWS and S (snow cover for stations of European Russia - meteo.ru) for marked station.

Snow data were taken from 229 stations from 2002 to 2011.

$$\Delta TWS = \Delta SN$$

Изменение запаса воды в
снежном покрове (XI-IV)

Корреляция фактических и рассчитанных значений снегозапасов для различных речных бассейнов



а) р. Вятка – г. Вятские Поляны; б) р. Ока – г. Муром; в) р. Дон – ст.Раздорская; г) р. Северная Двина – с. Абрамково; д) р. Печора – с. Оксино; е) р. Мезень – д. Малонисогорская

Расчёт систематической ошибки зимних осадков

$$P_{\text{расч}} = R + E + (TWS_{\text{кон}} - TWS_{\text{нач}})$$

рассчитанные осадки

$$P_{\text{изм}}$$

измеренные осадки

$$\text{bias} = (\sum P_{\text{расч}} - P_{\text{изм}}) / n$$

систематическая ошибка

Систематическая ошибка определения слоя осадков за холодный период для ряда водосборов

River	Area, km2	bias, %*	bias, %**
Oka	240000	23.9	9.2
Neva	280000	-2.5	-8.6
Don	380000	21.5	7
Pechora	310000	33.2	9.6
Northern Dvina	220000	20.4	3.1
Mezen'	56400	28.5	11.5
Vyatka	120000	20	14.4
Белая	120000	36.4	21

По данным метеостанций для осадков холодного периода европейской части России (ЕЧР) была получена величина их систематической ошибки — 20–25 %.

* – ошибка неоткорректированных осадков,

** – ошибка откорректированных осадков

Выводы: методы расчета и измерений

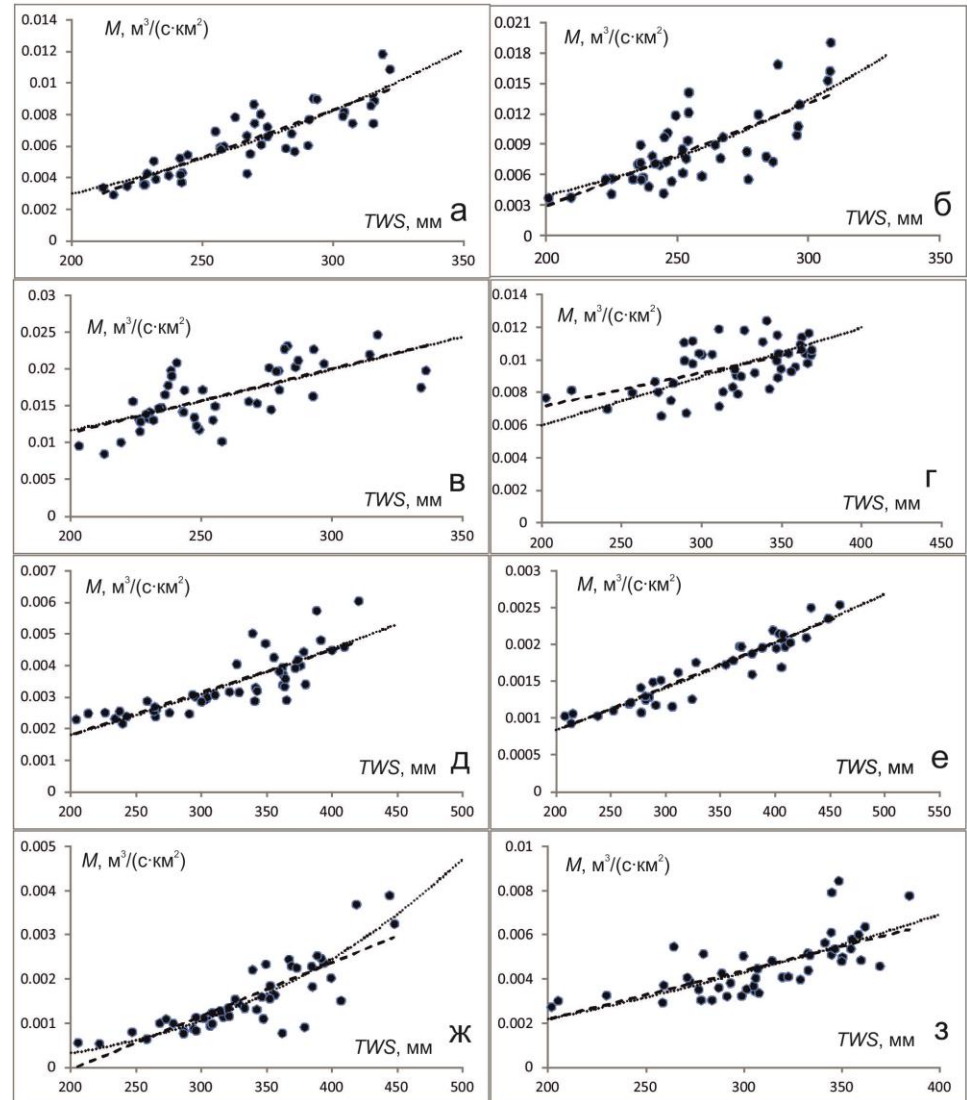
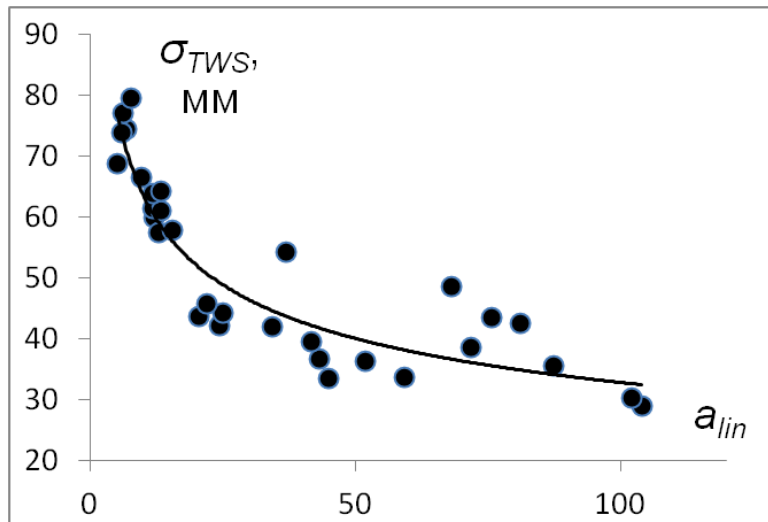
- 1) Сравнение рассчитанных и измеренных осадков холодного периода показало, что измеренные осадки занижены в среднем на 23.2%. Откорректированные по методике ГГО величины осадков занижены в среднем на 7.4%. Выявлено, что данные проекта GRACE по бассейновым влагозапасам более точные, чем данные глобальных моделей, входящих в систему GLDAS. В сравнении с ними данные GRACE практически не имеют систематической ошибки, а случайная ошибка меньше на десятки процентов.
- 2) Основным фактором, определяющим ошибку определения величины влагозапасов по данным GRACE для какой-либо территории, является ее площадь. Ошибка определения величины изменения бассейновых влагозапасов для ряда средних и крупных водосборов составила 12–20 мм.

Зависимость расходов воды от влагозапасов

$$R = a_{lin} \cdot TWS + b \quad R = k \cdot TWS^a$$

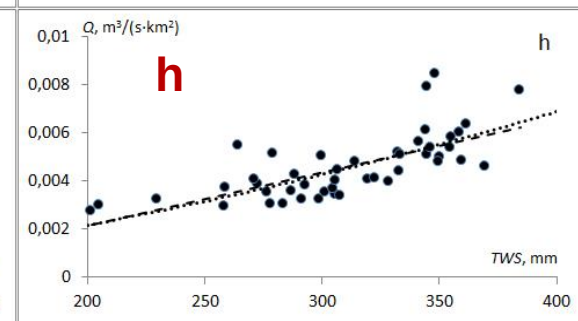
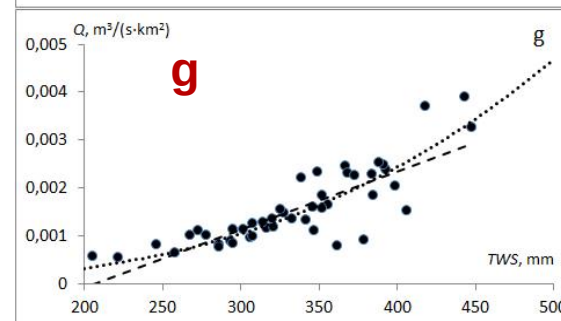
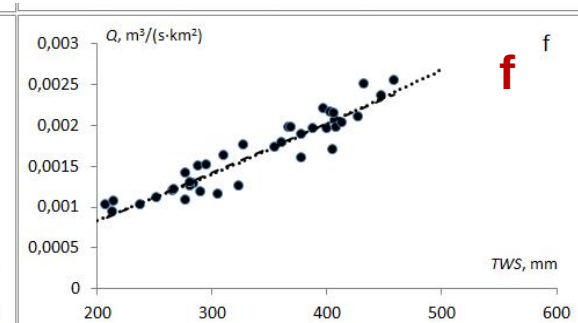
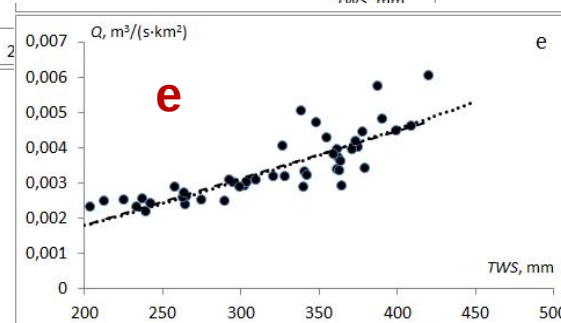
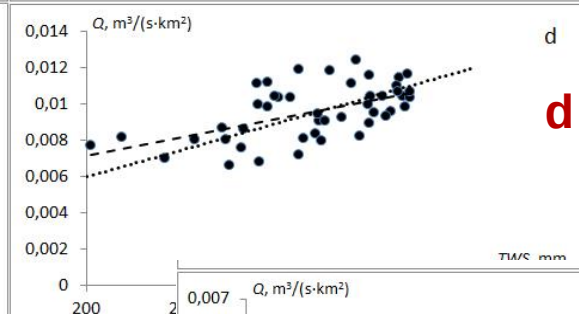
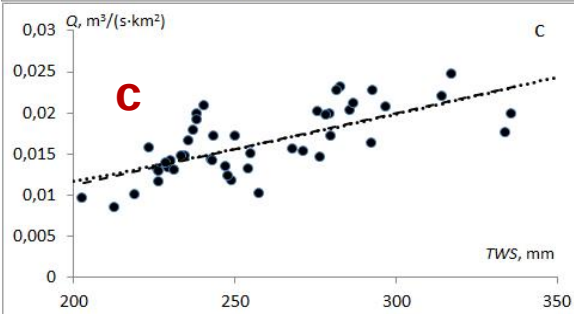
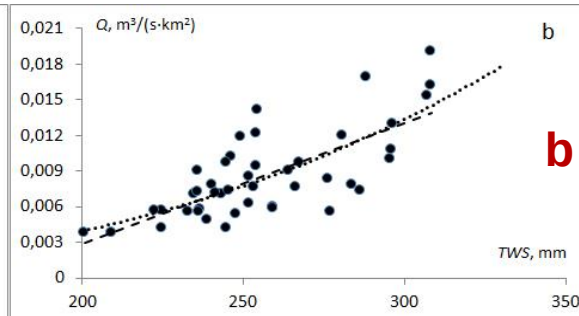
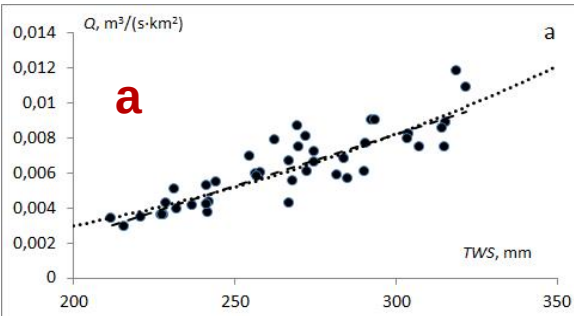
Северная Двина (а), Мезень (б), Печора (в), Нева (г), Ока (д), Дон (е), Самара (ж), Вятка (з)

Зависимость изменчивости
бассейновых влагозапасов от
коэффициента регрессии между
расходами воды и влагозапасами



Зависимость расходов воды от величины влагозапасов для июля-октября месяцев

Northern Dvina - Ust Pinega (a), Mezen – Malonikolskaya (b), Pechora – Oksino (c), Neva-Novosaratovka (d), Oka-Gorbatov (e), Don-Belyaevsky (f), Sakmara - Kargala (g), Vyatka - Vyatskiye Polyany (h) river basins.



$$M = a(TWS)^b,$$

$$M = a_{\text{лин}} TWS + c$$

All units on the vertical axes are in $(\text{m}^3/\text{s})/\text{km}^2$. All units on the horizontal axes are in mm. Dashed line - linear dependence, dot line - power dependence.

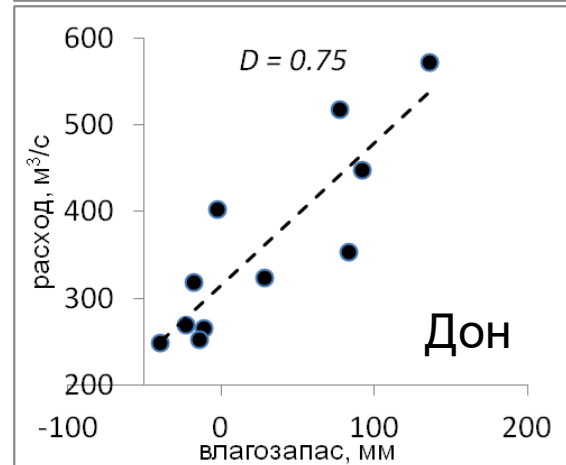
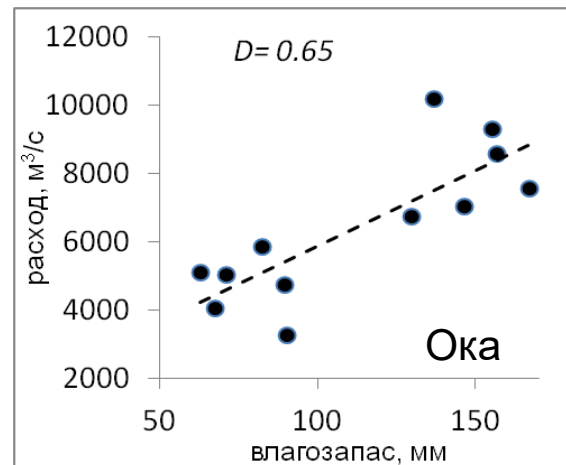
Зависимость расхода воды от предыдущих влагозапасов

Сравнение точности расчета расходов воды за июль и август по влагозапасам (1) и расходам воды в июне (2). Номером обозначена зависимость, которая показала лучший результат

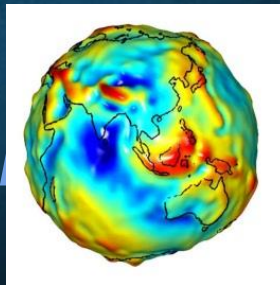
$$Q_j = \alpha TWS_i + b \quad (1)$$

$$Q_j = \alpha Q_i + b \quad (2)$$

Река – пост	Площадь, тыс. км ²	Прогноз на	
		VII	VIII
р. Северная Двина – с. Абрамково	220	2	1
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега	350	2	1
р. Печора – с. Оксино	310	1	1
р. Ока – г. Калуга	54.9	2	1
р. Ока – с. Половское	99	1	1
р. Ока – г. Муром	190	1	1
р. Ока – г. Горбатов	240	2	2
р. Белая – г. Уфа	100	1	2
р. Белая – г. Бирск	120	2	1
р. Вятка – г. Киров	48.3	2	1
р. Вятка – пос. Аркуль	96.9	2	1
р. Вятка – г. Вятские Поляны	120	1	1
р. Дон – ст. Казанская	100	2	1
р. Дон – х. Беляевский	200	2	1

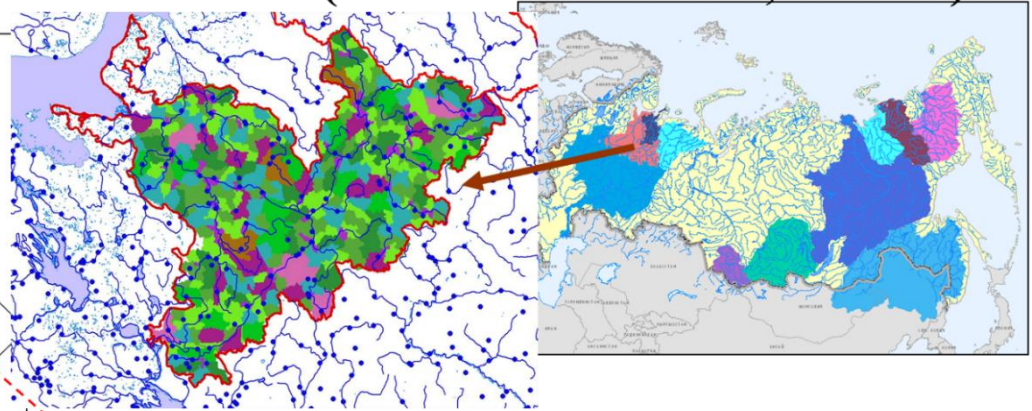
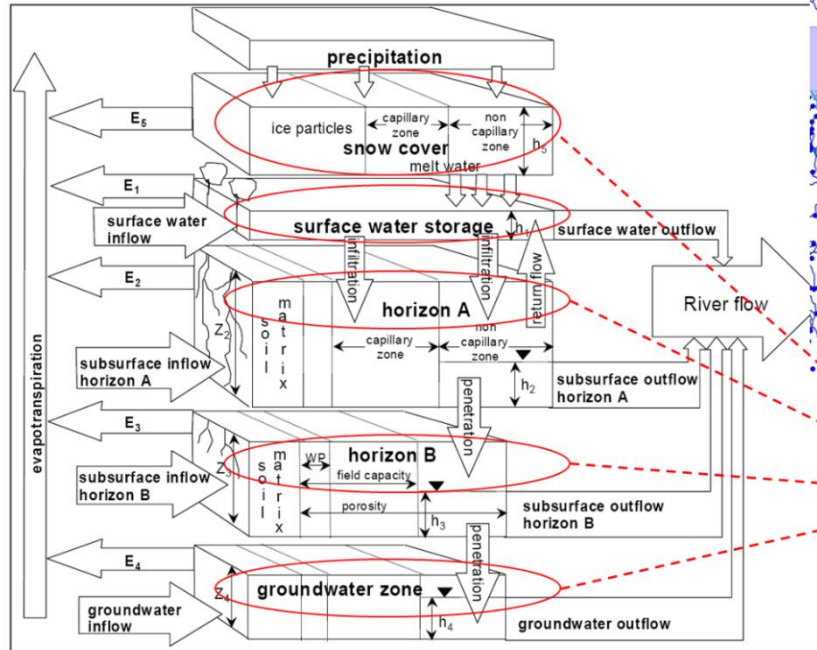


4. Сравнение месячных значений *TWS* по данным *GRACE* с оценками, полученными с помощью гидрологической модели



ECOMAG (Ecological Model for Applied Geophysics) (Motovilov et al., 1999)

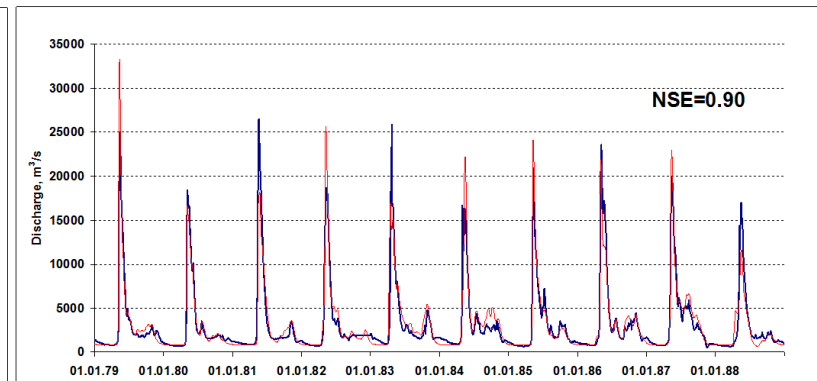
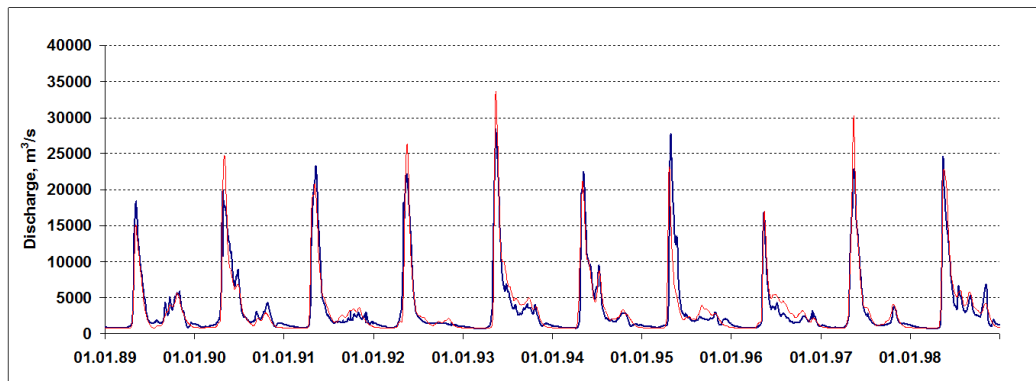
Case Study: Northern Dvina River Basin (catchment area 360,000 km²)



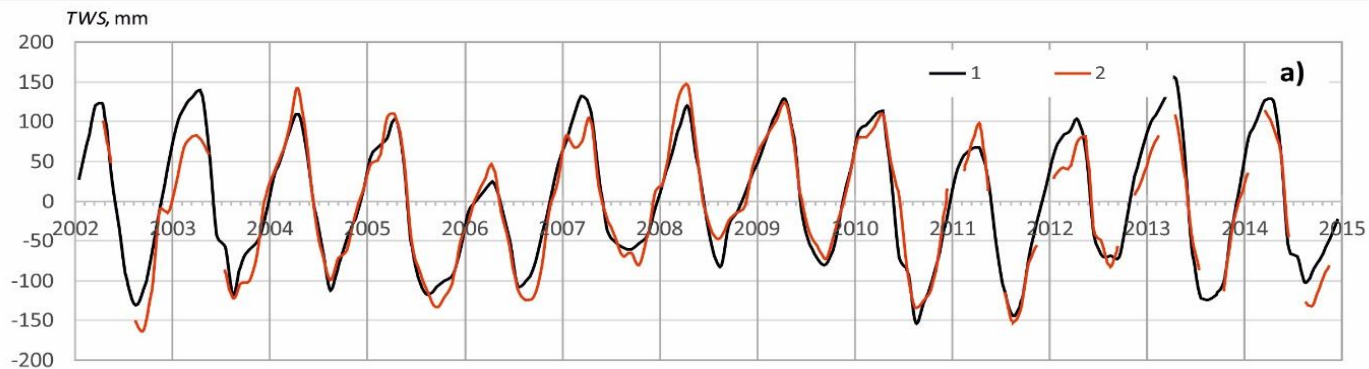
Basin TWS (= sum of all surface water, soil moisture, snow water, and groundwater) is simulated by ECOMAG with daily time step

Calibration: 1989-1998

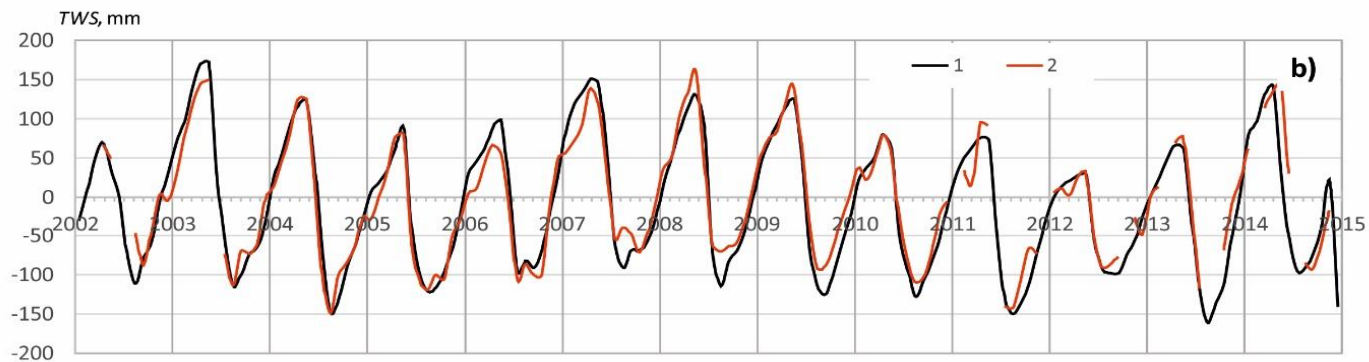
Validation: 1979-1988



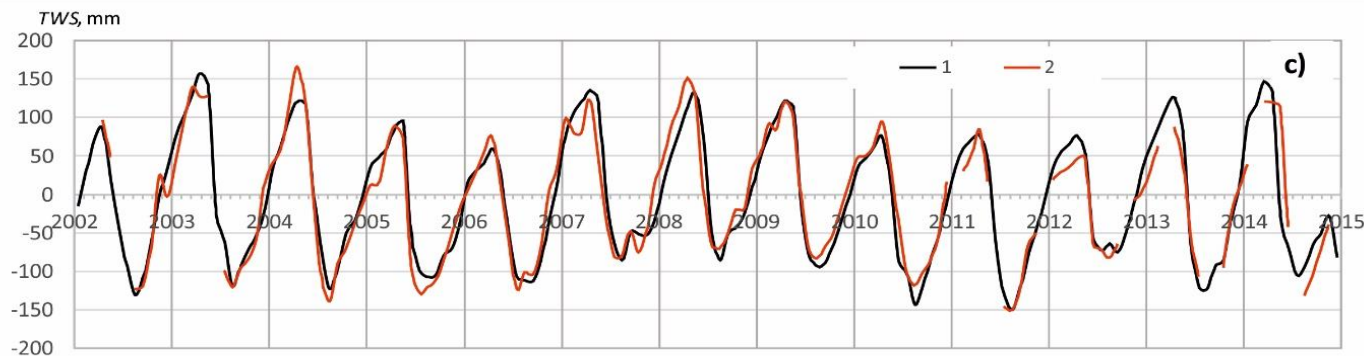
Сравнение месячных значений TWS по данным GRACE (2002-2015 гг.) с TWS-оценками, полученными по модели ECOMAG



TWS anomaly
for Northern
Dvina (a),

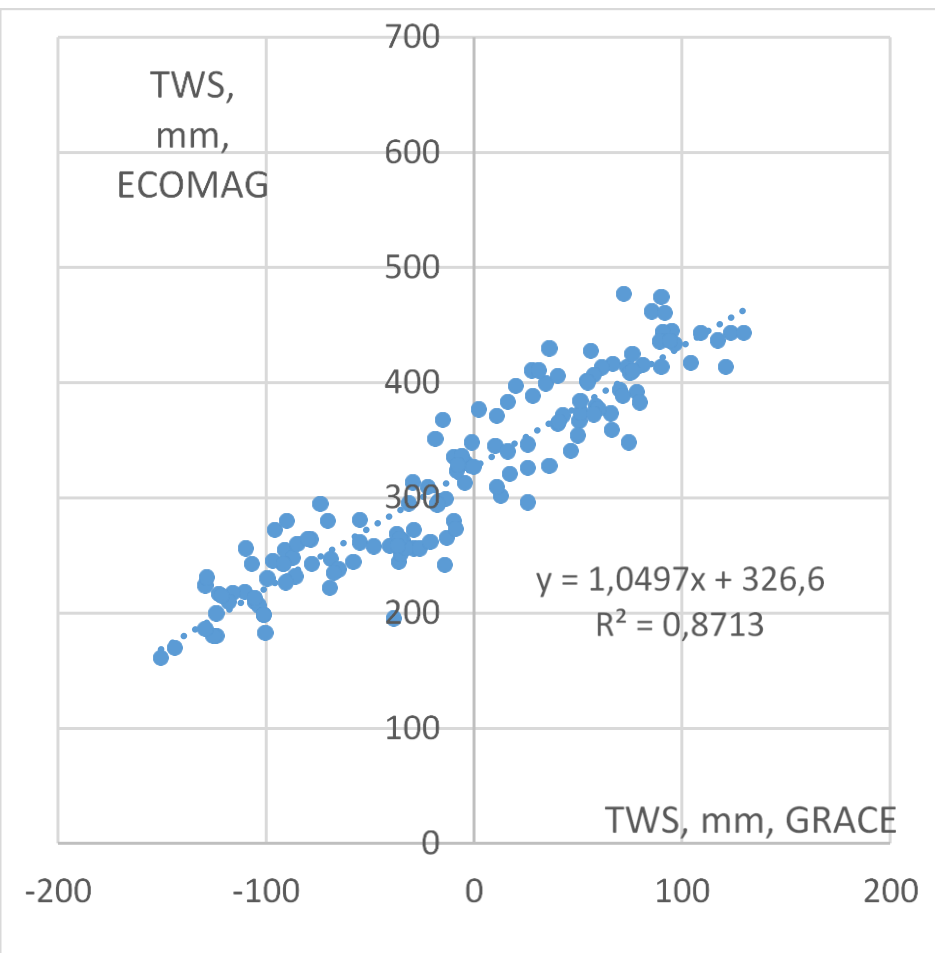


Pechora (b),



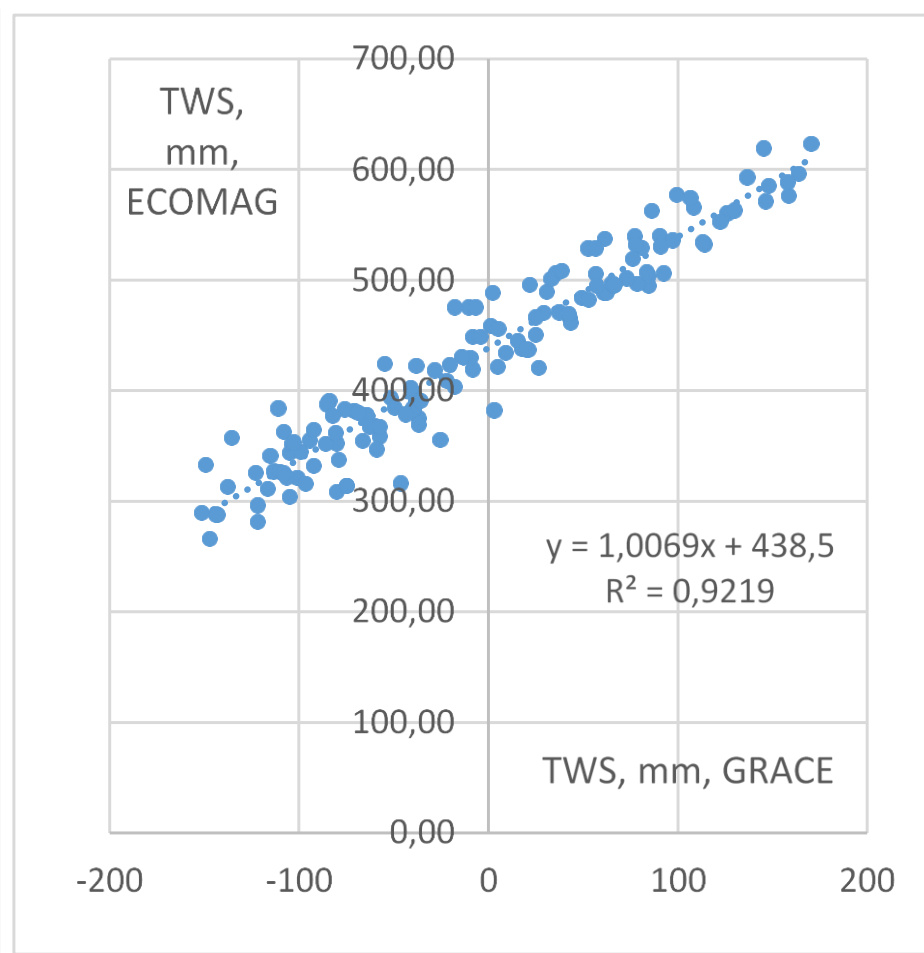
and Mezen (c)
Rivers according
to ECOMAG (1)
and GRACE (2).

Сравнение месячных значений TWS по данным GRACE (2002-2015 гг.) с TWS-оценками, полученными по модели ECOMAG



a)

***Northern
Dvina basin***



б)

Pechora basin

Оценка точности суточных данных по влагозапасам, без сезонной и многолетней составляющей

	Бассейн	GRACE	ECOMAG	ИВМ РАН - МГУ
$\sigma_{err}, \text{мм}$	Северная Двина	12.2	9.1	11.6
	Печора	14.3	10.0	14.6
$\frac{\sigma_{err} * 100}{\sigma_{res}}, \%$	Северная Двина	66	51	58
	Печора	73	52	74

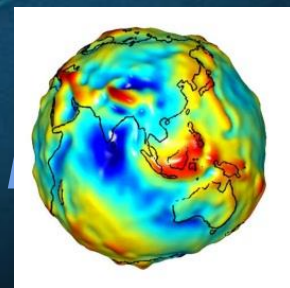
σ_{err} - ошибка определения TWS, в мм.

σ_{res} - внутрисезонная изменчивость влагозапасов, мм

<https://ges.rgo.ru/jour/article/view/3184>



5. Выводы

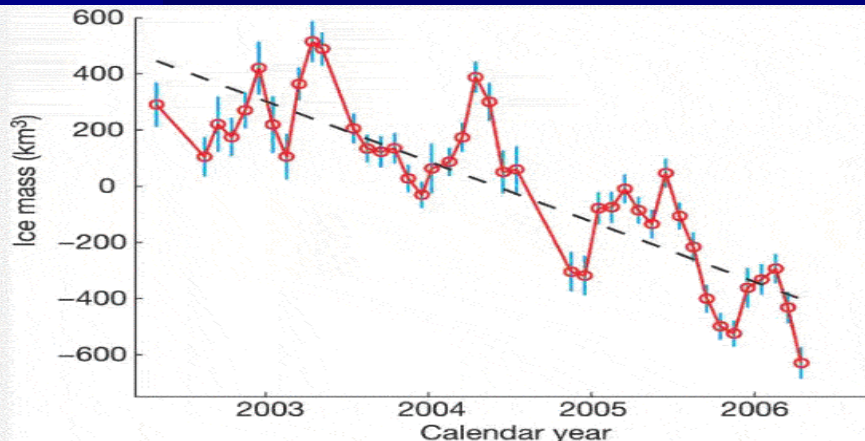
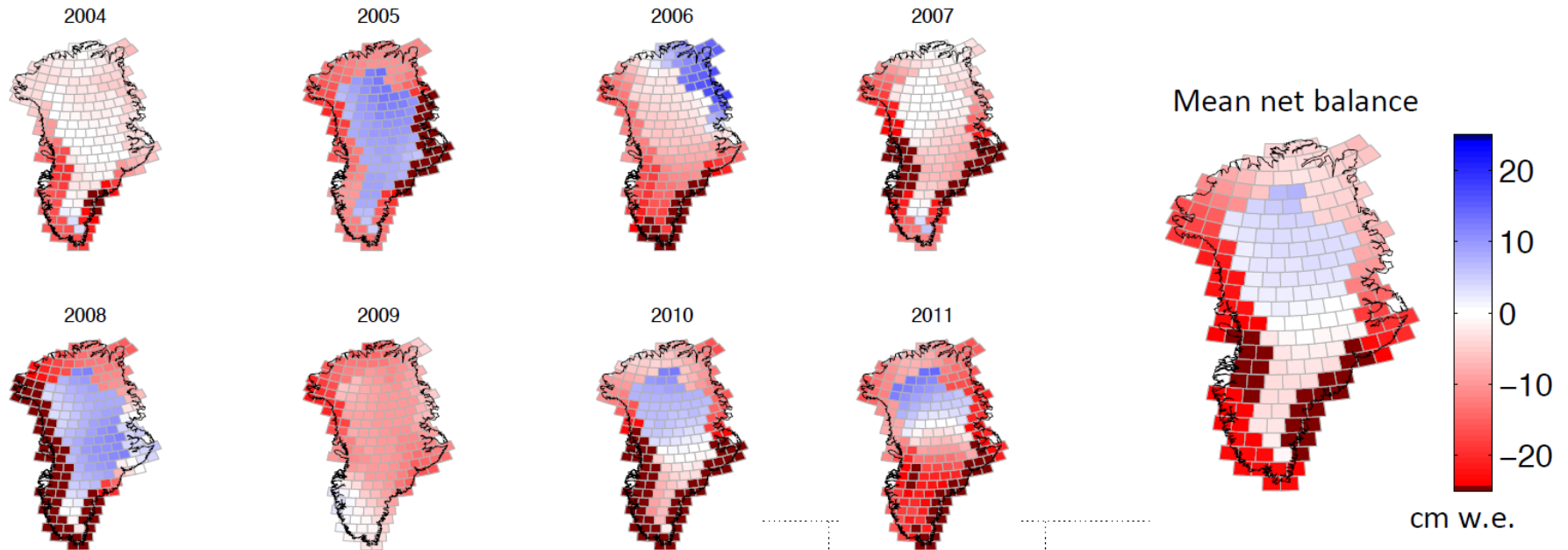


- Данные измерений космической гравитации чрезвычайно полезны в гидрологии. GRACE - это технология, доступная для глобального мониторинга общих влагозапасов в режиме, близком к реальному времени.
- GRACE предоставляет беспрецедентную возможность улучшить количественную оценку, понимание и моделирование изменчивости влагозапасов. Для улучшения оценок целесообразно объединить моделируемые значения TWS с независимыми наблюдениями, предоставляемыми гравитационными данными GRACE.
- Данные GRACE перспективны для оценки систематических и случайных ошибок в расчетах или измерениях элементов водного баланса.
- Данные GRACE могут быть использованы для оценки изменения водных ресурсов крупных речных бассейнов и территорий под влиянием климатических и антропогенных факторов. Дистанционная информация хорошо согласуется с данными гидрологических моделей и измерений для бассейнов крупных рек за отдельные периоды времени.
- В связи с запуском в 2018 году новых спутников (GRACE Follow-On) сфера их применения в гидрологии расширится.
- В настоящее время прогресс в применении данных GRACE в гидрологии лимитируется их низким пространственно-временным разрешением, которое, в рамках самой миссии GRACE, в ближайшие годы улучшено не будет.

Перспективы

- **Данные становятся все легче использовать:**
 - COST-G – комбинация данных с различных центров обработки, учитывающая их точность.
 - G3P – выделены отдельные составляющие влагозапасов, ассимиляция других продуктов.
- **Растет точность вспомогательных геофизических моделей (AOD1B)**
- В 2021 г. Китаем была запущена миссия аналогичная GRACE. Она функционирует, точность похожая, но пока информация на уровне отчетов, без общедоступных баз данных. Уже есть планы на следующую миссию.
- Подписан договор на GRACE-C (NASA). Запуск не ранее конца 2028 г.
- **Еще пара спутников от ESA (2032 г.), наклонная орбита – при совместном использовании с GRACE-C возможен существенный прирост точности.**
- Дальнейшие планы – квантовые гравиметры, более совершенные интерферометры, т.е. технические возможности для роста точности измерений есть.
- **GRACE, GRACE-FO и GRACE-C каждая стоят порядка 500 млн \$ без учета инфляции. Т.е. с учетом инфляции GRACE-C примерно в два раза дешевле первой миссии GRACE.**
- Для расчета аномалий гравитационного поля теоретически возможно использование данных о скорости и положении спутников без специального оборудования, но в настоящее время точность слишком мала. Сейчас используются лишь данные SLR.

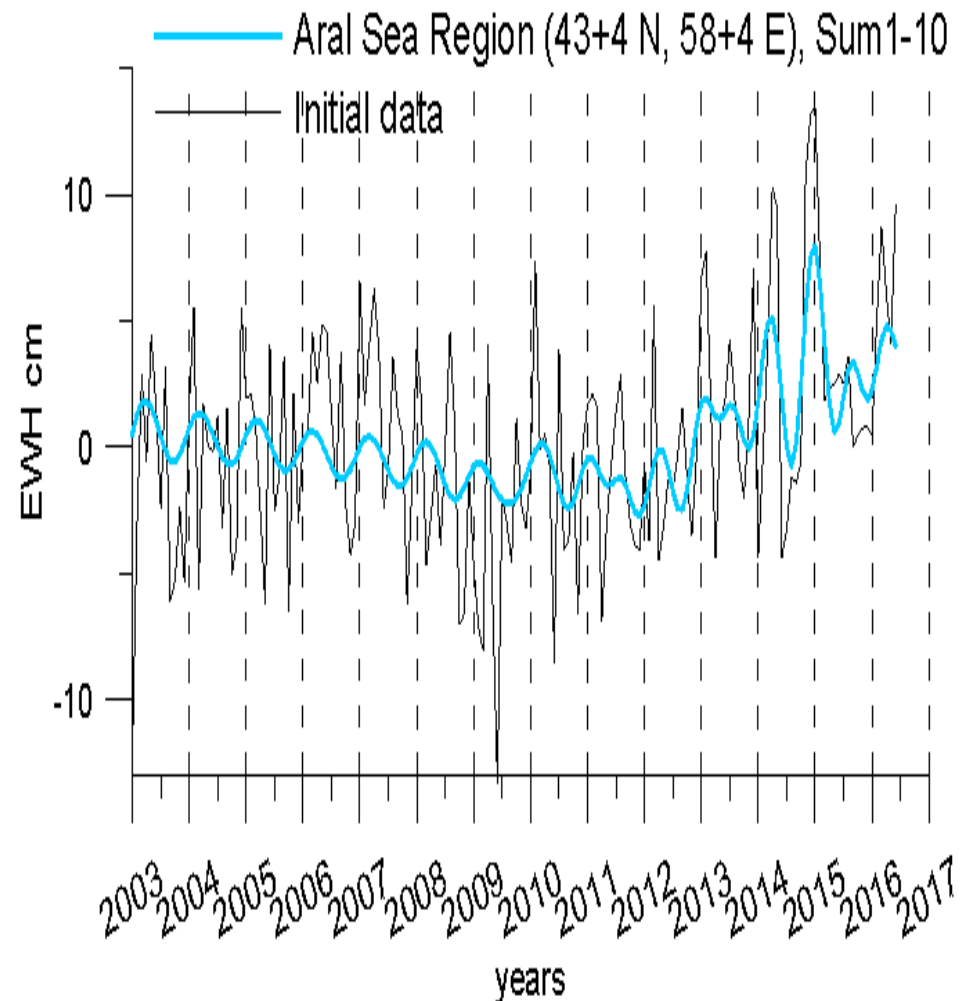
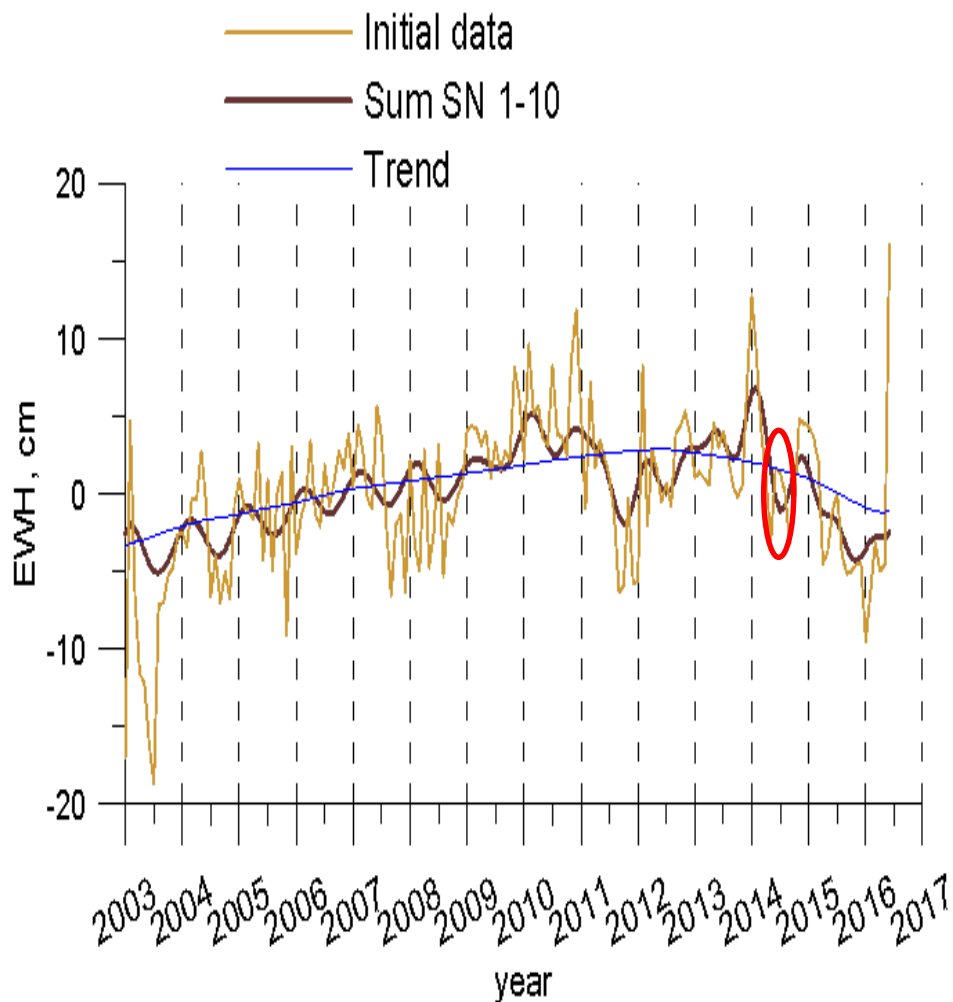
Изменение массы ледников Гренландии



Land ice mass evolution from the
new GSFC mascon solution

Scott Luthcke (1), Bryant Loomis (2), Terry Sabaka (1), Anthony Arendt (3)

Засухи на озере Байкал и Аральское море



МНОГОЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ СТОКА РЕК В БАССЕЙНЕ СЕЛЕНГИ

ФРОЛОВА Н.Л.¹, БЕЛЯКОВА П.А.², ГРИГОРЬЕВ В.Ю.^{1,3}, САЗОНОВ А.А.^{1,3}, ЗОТОВ Л.В.⁴

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Гидрометцентр России

³ Институт водных проблем РАН, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3

⁴ Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга



Глобальные процессы перераспределения теплоты



Круговорот теплоты на земном шаре и роль природных вод

Глобальный среднегодовой тепловой баланс Земли (Вт/м^2)

[Trenberth et al., 2009]

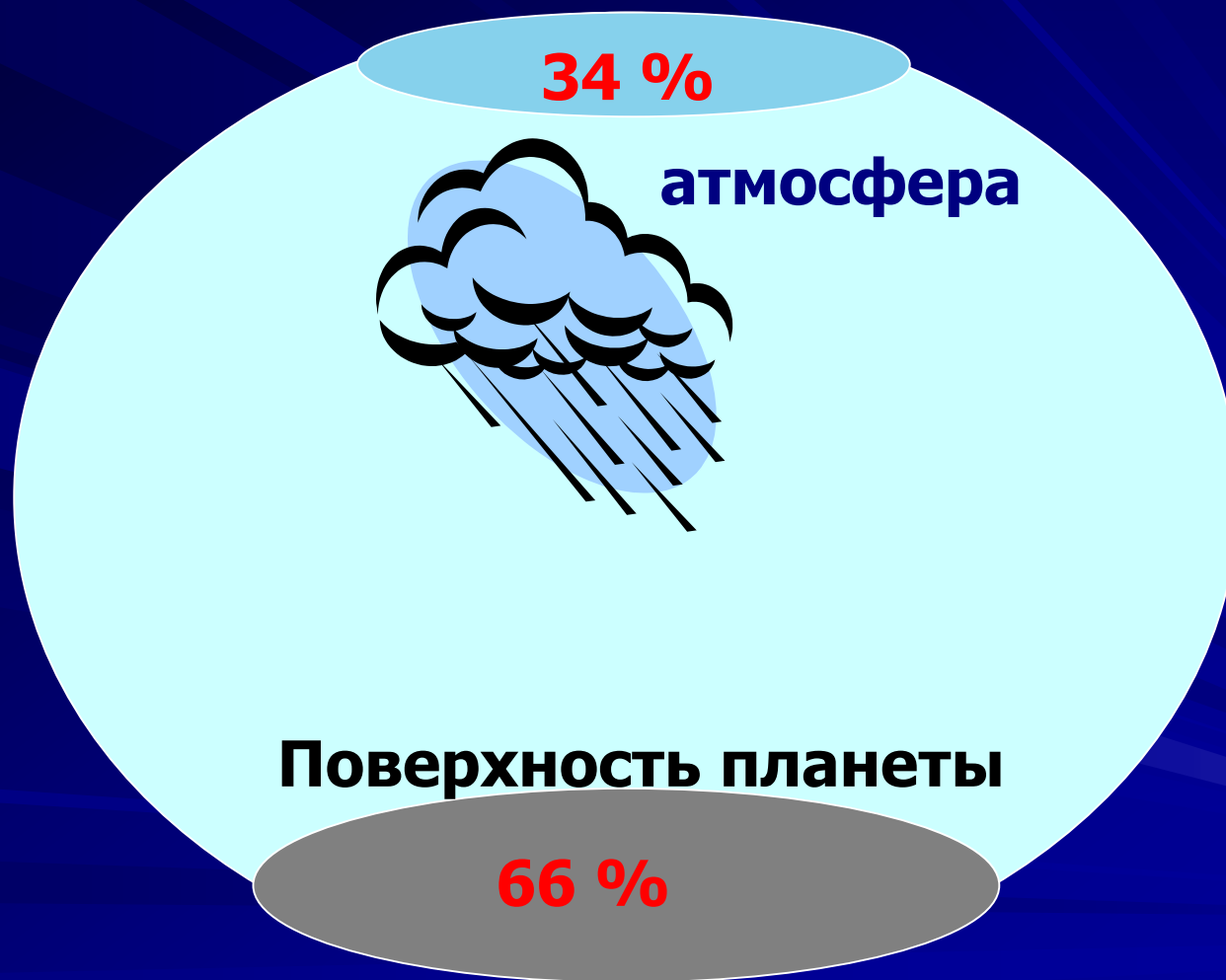
Глобальные потоки энергии Вт/м^2



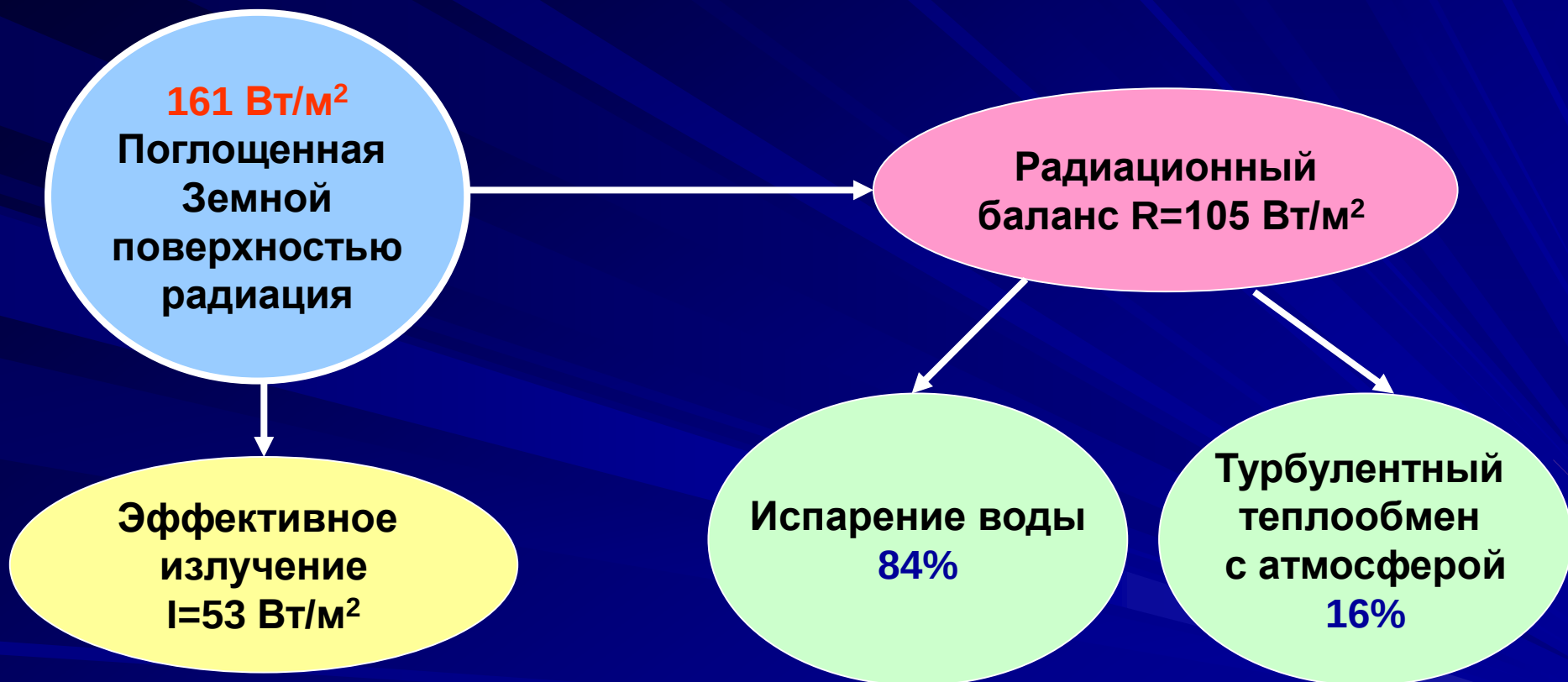
Солнечная энергия поглощается земной поверхностью и нагревает ее

... и оно конвертируется в тепло, вызывая эмиссию длинноволновой (инфракрасной) радиации в атмосферу

Распределение поглощенной ($239,3 \text{ Вт/м}^2$) солнечной энергии (М.И.Будыко)



Распределение поглощенной солнечной энергии



Солнечная энергия перераспределяется между поверхностью земли и атмосферой, между сушей и океаном. При этом природные воды выступают и как **поглотитель** и **регулятор** поступающей солнечной энергии, и как фактор ее перераспределения на Земле.

■ В целом для Земли:

$$R_{\text{пов}} = \Theta_{\text{исп}} + \Theta_{\text{атм}}$$

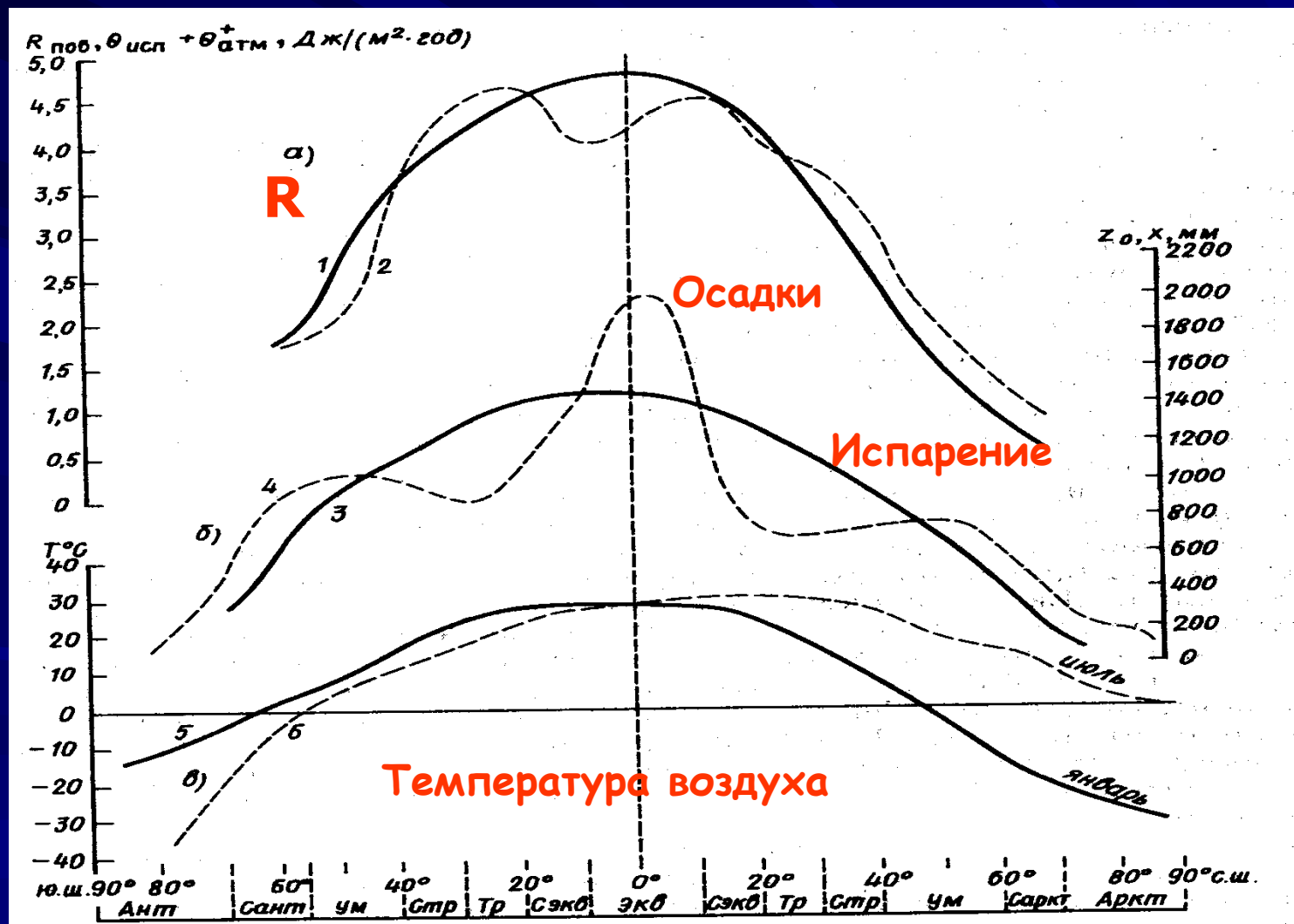
На экваторе: $R_{\text{пов}} > \Theta_{\text{исп}} + \Theta_{\text{атм}}$

На суше на испарение тратится 54% энергии радиационного баланса, на поверхности океана — более 90%

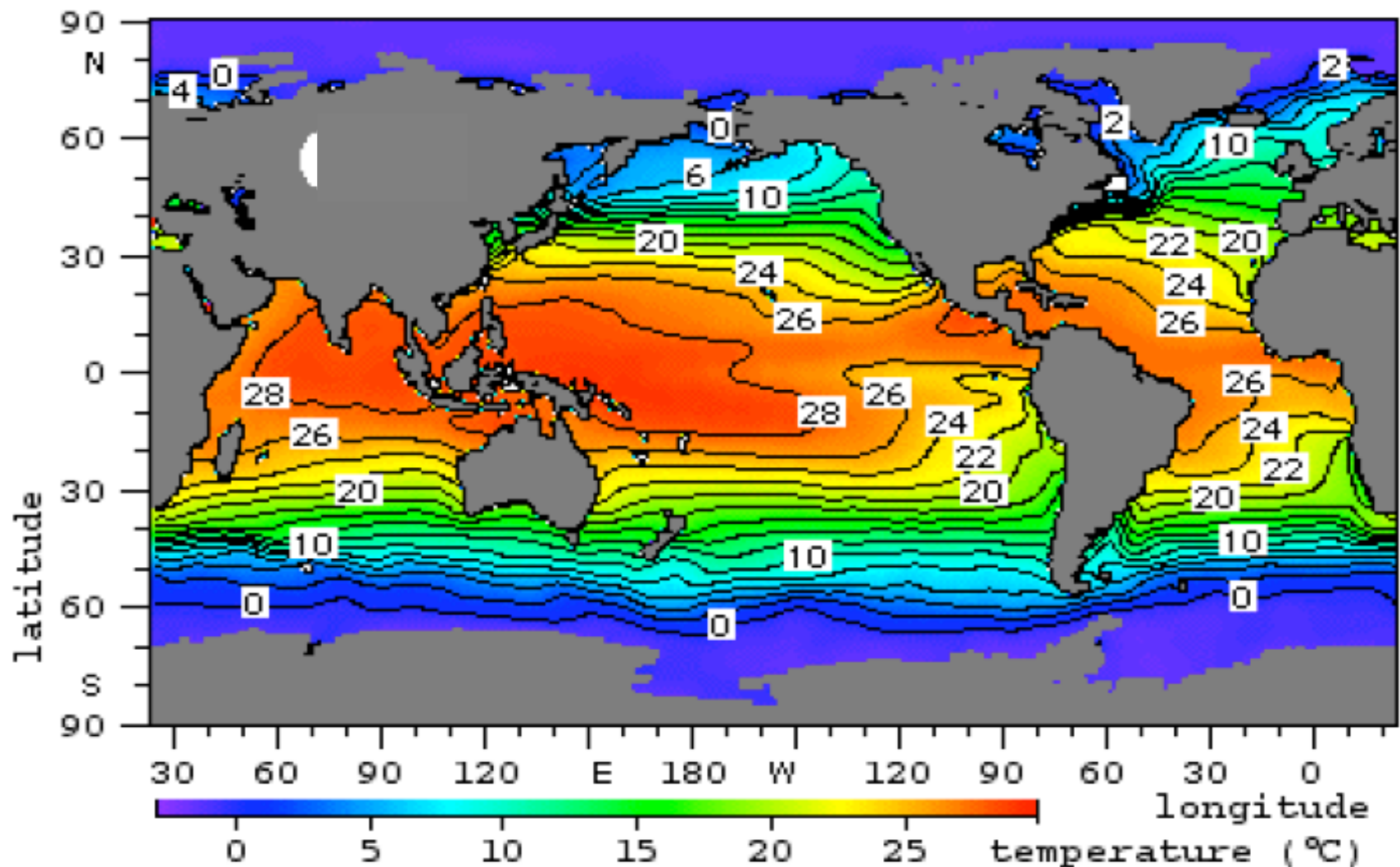
Океан, имея температуру поверхностного слоя в среднем более высокую, чем атмосфера (приблизительно на 3° С), играет важную роль в теплообмене и обогревает атмосферу. По расчетам В. Н. Степанова (1983), в океане содержится около $31,8 \cdot 10^{27}$ Дж теплоты — в 21 раз больше, чем в атмосфере

Гидросфера играет важную роль в перераспределении тепла на земной поверхности.

**Распределение радиационного баланса (1) и затрат
теплоты на испарение и теплообмен с атмосферой (2) (а),
испарения (3) и осадков (4) (б), температуры воздуха (5,6) (в)**



Распределение поверхностной температуры Мирового океана

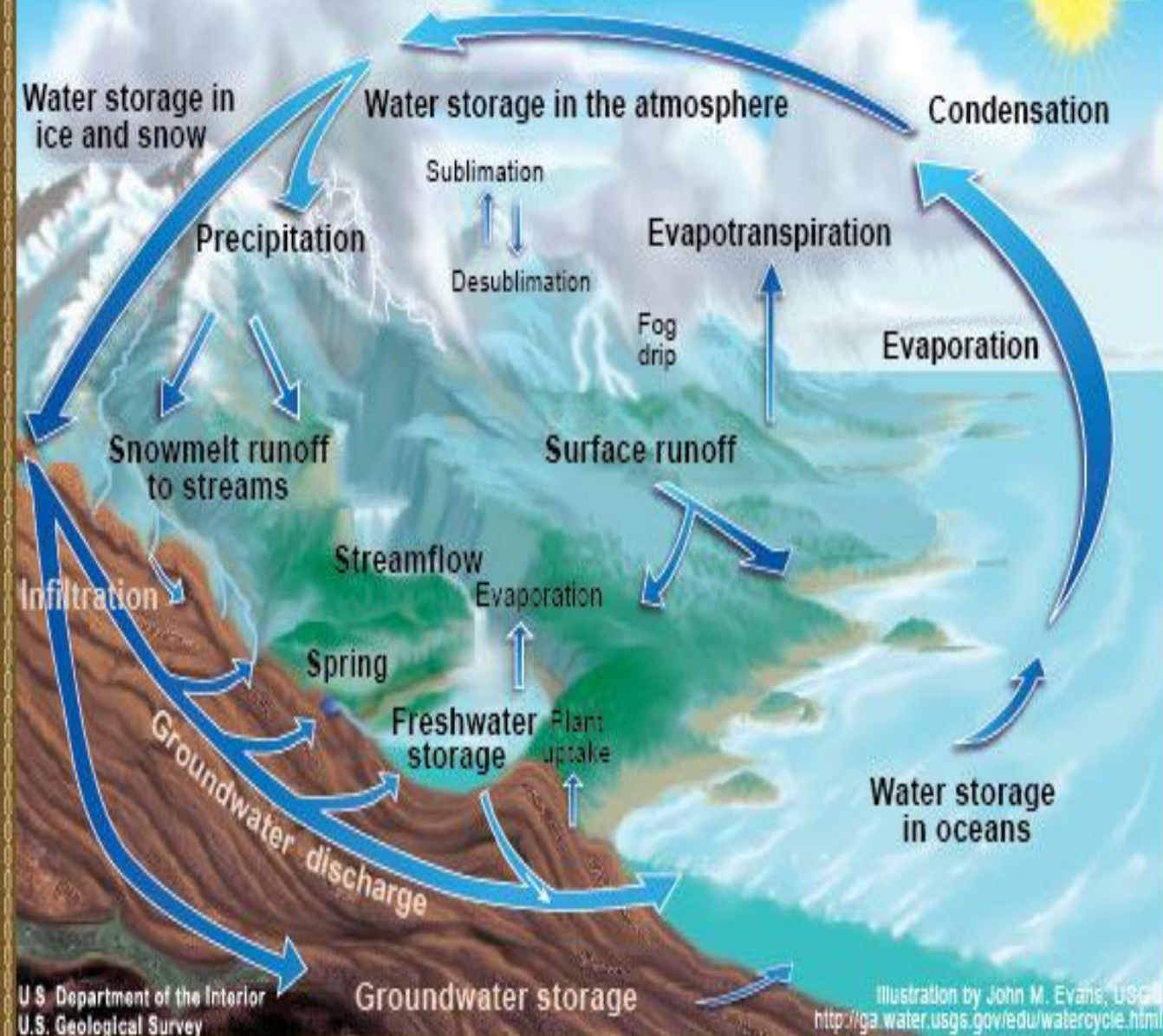


Круговорот воды -
механизм
перераспределения на
Земле вещества и
энергии, объединяющий
водные объекты и
разные части планеты

Круговорот воды



The Water Cycle



Процессы в гидросфере:

Испарение

Транспирация

Перемещение
атмосферной влаги

Конденсация

Выпадение осадков

Инфильтрация

Поверхностный сток

Подземный сток

Аккумуляция воды в
водоемах

Аккумуляция воды в
подземных водоносных
горизонтах

Накопление воды в
твердой фазе

Круговорот воды на земном шаре

- форма реализации закона сохранения вещества на планетарном уровне
- условие существования биосферы
- фактор эрозии и седиментации
- движущая сила выветривания и переноса растворенных и взвешенных веществ, теплоты и т.п.
- механизм возобновления водных ресурсов

Физическая причина круговорота воды

- **неравномерное распределение
солнечной энергии на поверхности
планеты**
- **сила тяжести**

Характеристика роли солнечной радиации в круговороте воды

- **нагревание и испарение воды**
- **неравномерность нагревания, распределения давления, температуры воздуха и испаряемости, осадков**
- **неравномерность прогрева воды и плотности воды, возникновение плотностных течений**

Характеристика роли силы тяжести в круговороте воды

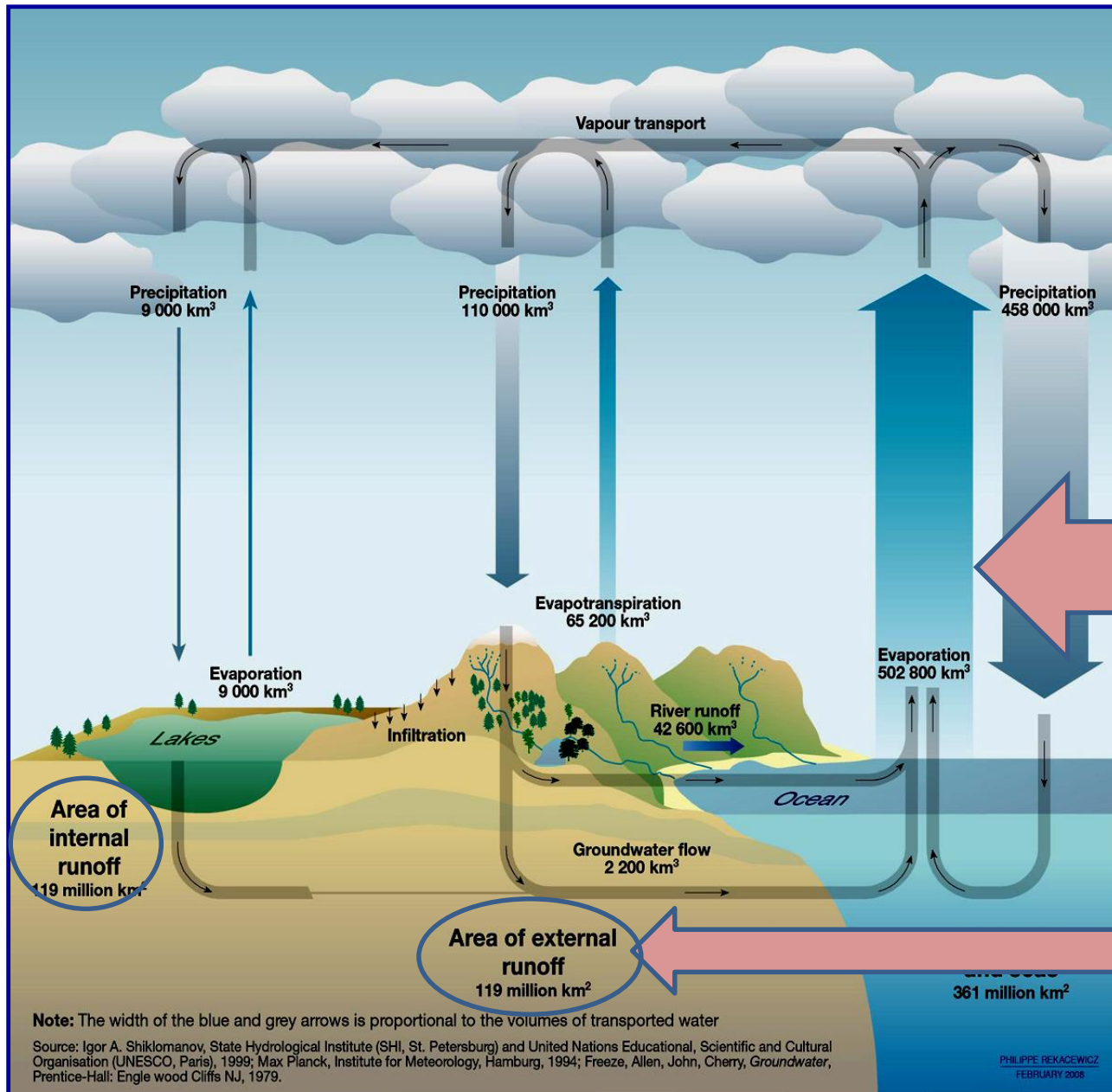
- выпадение атмосферных осадков
- движение поверхностных и подземных вод
- фильтрация вод

Звенья глобального круговорота воды

■ **океаническое звено**

■ **материковое звено**

Круговорот воды на земном шаре

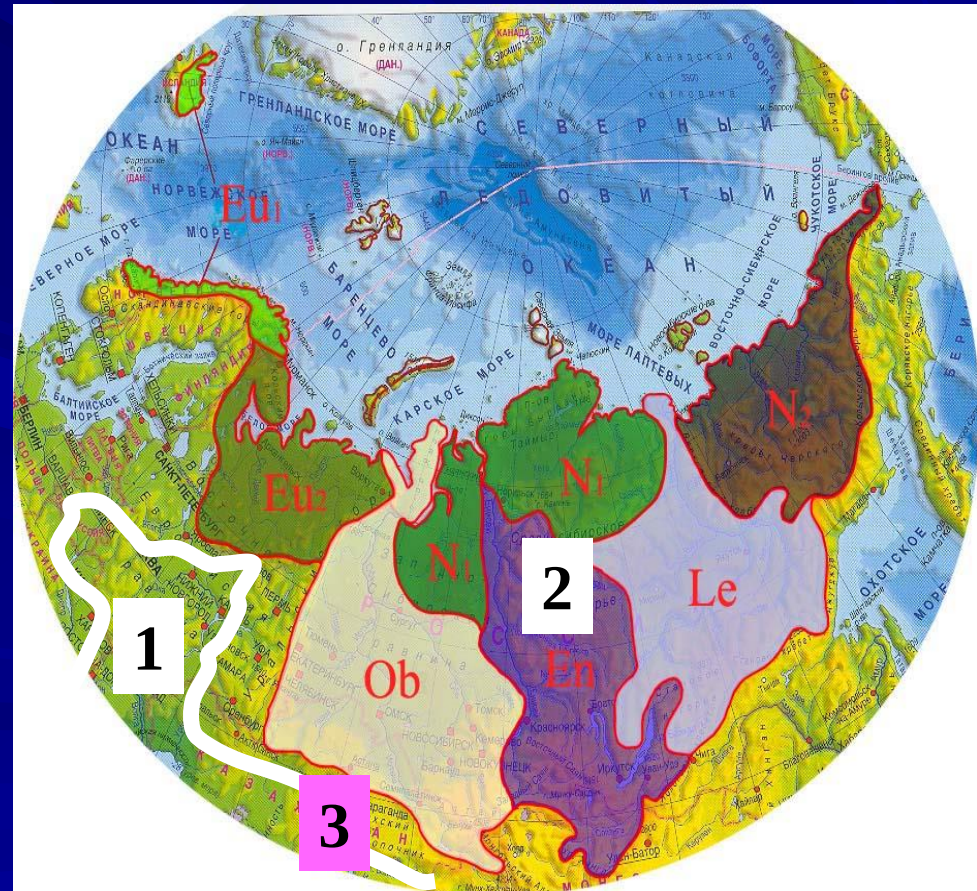


- океаническое звено

- материковое звено

Области внешнего и внутреннего стока воды в материковом звене круговорота

- области (2) внешнего стока (80% суши) (осадки поступают в Мировой океан)
- области (1) внутреннего стока (20%), не дающие стока в Мировой океан
- водоразделы (3)



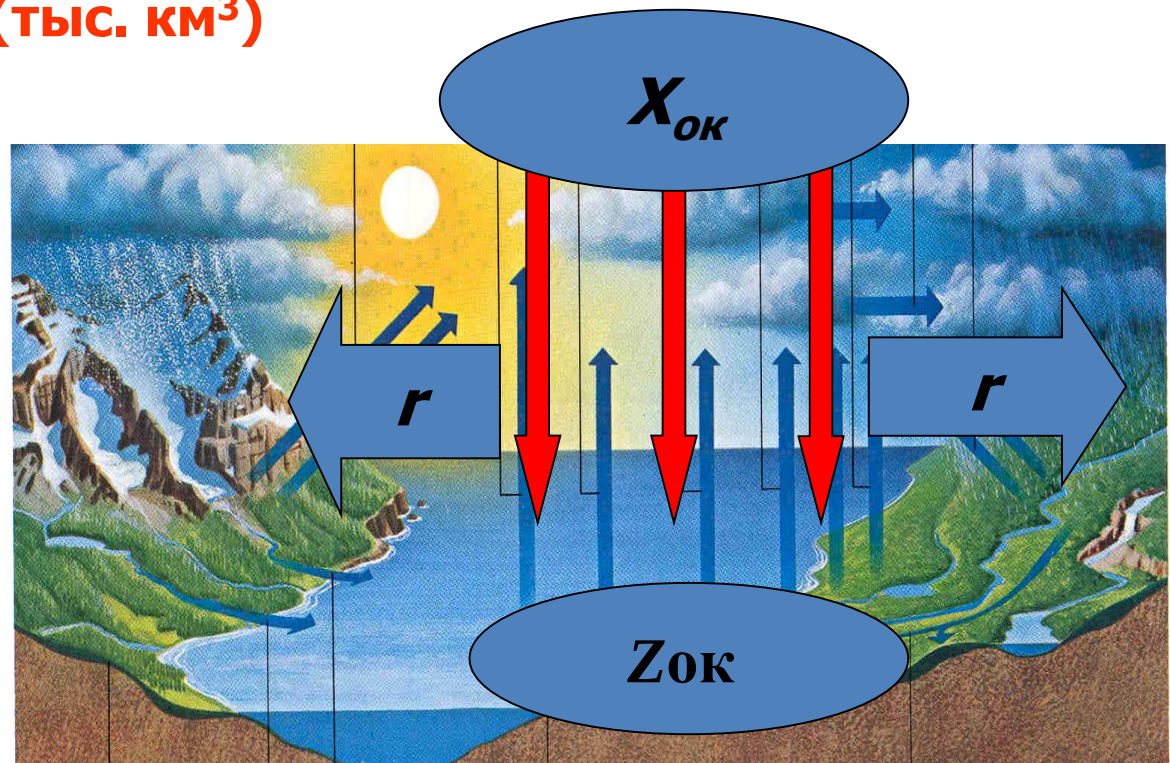
Характеристика океанического звена круговорота воды

В океаническое звено вовлечено
458 тыс. км³ воды в год

$$Z_{ок} = X_{ок} + r$$

$$505 = 458 + 47 \text{ (тыс. км}^3\text{)}$$

- испарение $Z_{ок}$
- перенос влаги r
- осадки $X_{ок}$
- течения
- испарение



Характеристика материкового звена круговорота воды

- Испарение (Z_c)
- перенос влаги (r)
- Осадки (X_c)
- поверхностный ($Y_{\text{речн.}}$ и $Y_{\text{ледн.}}$) и подземный сток (W)

В материковом круговороте принимает участие 72 тыс. км³/год

$X_c = Z_c + r$ (уравнение водного баланса для суши)

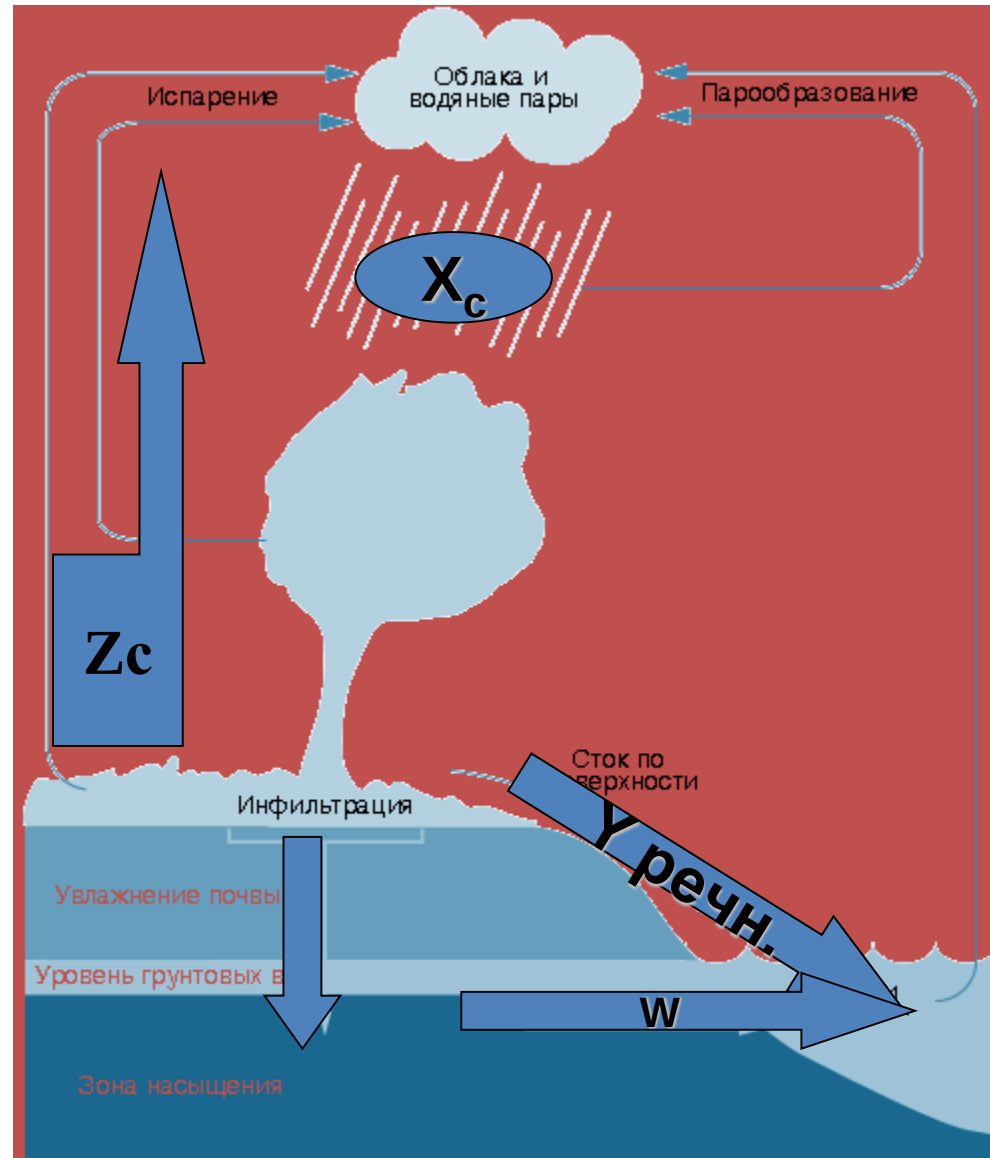
$$119 = 72 + 47 \text{ (тыс. км}^3\text{)}$$

Водообмен суши и океана - 47 тыс. км³/год

Переносимая влага (r) возвращается в океан в виде материкового стока ($Y_c = r$)

$$Y_c = Y_{\text{речн.}} + Y_{\text{ледн.}} + W$$

$$47 = 41,7 + 3,0 + 2,3 \text{ (тыс. км}^3\text{/год)}$$



Составляющие водного баланса для областей внешнего и внутреннего стока

$X_c = X_c' + X_c''$ – осадки для всей поверхности суши, областей внешнего и внутреннего стока

$$119 = 110 + 9 \text{ (тыс. км}^3\text{/год)}$$

$Z_c = Z_c' + Z_c''$ – испарение для всей поверхности суши, областей внешнего и внутреннего стока

$$72 = 63 + 9 \text{ (тыс. км}^3\text{/год)}$$

Уравнение водного баланса (закон сохранения вещества) для суши: $X_c' = Z_c' + Y_c$ (110=63+47)

$$X_c'' = Z_c'' \quad (9=9)$$

Результирующая баланса воды на Земле за многовековые периоды времени

$$Z_3 = X_3 \quad (505 + 63 + 9 = 458 + 110 + 9)$$

$$577 = 577 \text{ (тыс. км}^3\text{/год)}$$

$$Z_{\text{ок}} - X_{\text{ок}} = r = Y_c = X_c' - Z_c'$$



$r > Y_c \quad dH/dt < 0$ -
уровень океана
понижается,
объем ледников
возрастает

$r < Y_c \quad dH/dt > 0$ -
уровень океана
повышается,
объем ледников
сокращается

Структура материкового стока воды (тыс. км³/год)

суммарный поверхностный сток

44,7

речной сток - 41,7 (+0,5)

ледниковый - 3,0 (+0,8)

Подземный сток 2,3 (+0,5)

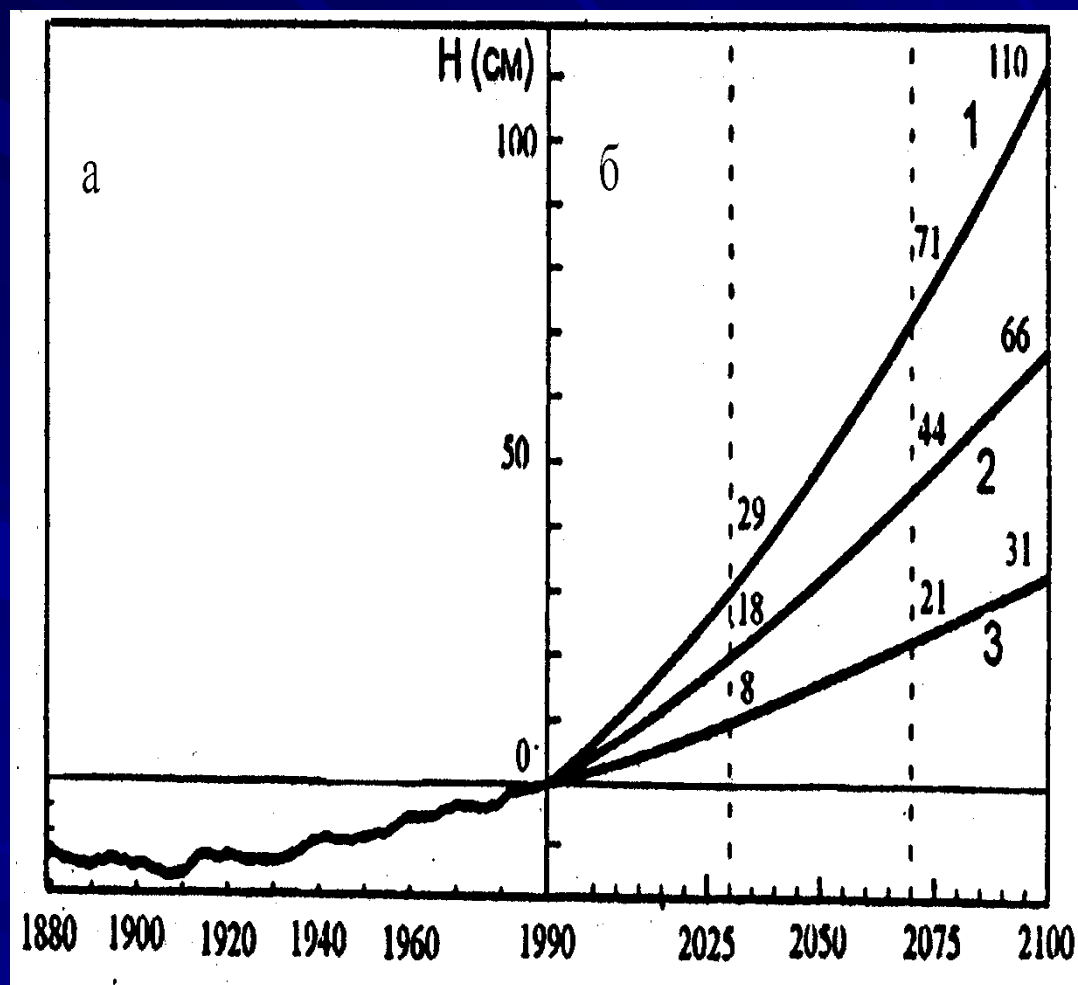
Изменения уровня Мирового океана: по наблюдениям (а) и прогнозу (б)

ожидаемый рост
уровня:

1 – максимальный

2 – средний

3 – минимальный

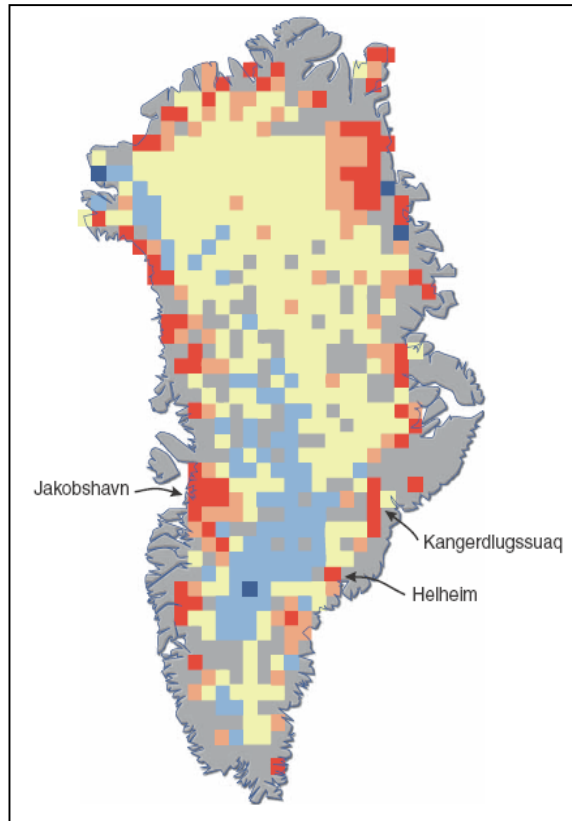


Ледниковый сток



Гренландия и Антарктика содержат 99% пресного льда на поверхности земли. Талая вода от ледяных щитов способствует повышению уровня моря.

Ледяной покров: тенденции



Гренландия: последние изменения

Желтый = нет или
маленькое изменение

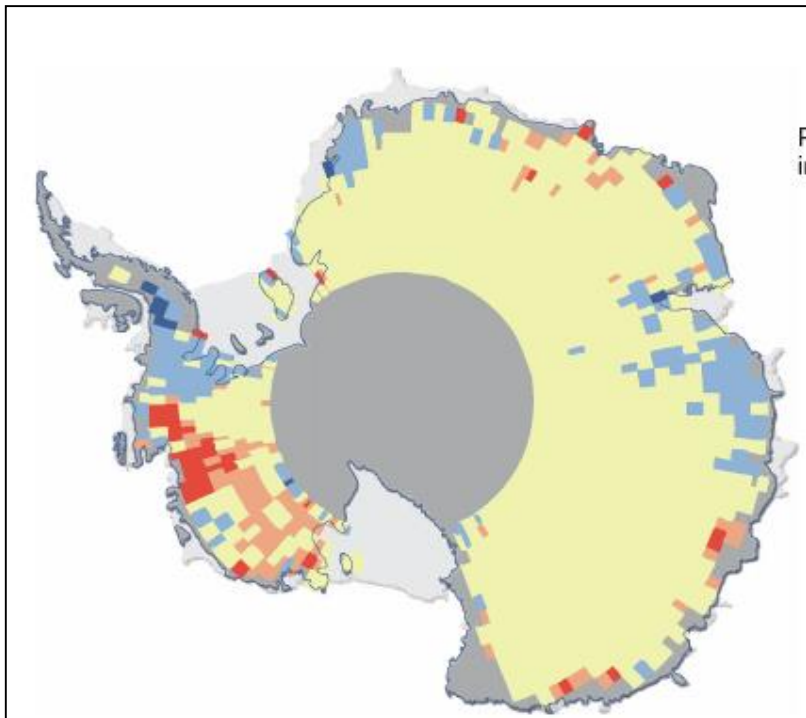
Голубой =
снегонакопление

Красный = (таяние и
расход льда)



- Ежегодная общая потеря массы Гренландского ледяного покрова увеличилась в более чем **два раза** в последнем десятилетии 20 века и возможно снова **удвоилась** к 2005 году.
- Более теплое лето увеличивает таяние и расход льда.

Ледяной покров: тенденции



Желтый = нет или

маленькое изменение

Голубой = накопление
снега

Красный = менее
массовый (таяние и
расход льда)

- Относительно изменений массы льда в Антарктическом ледяном покрове за последнее время пока неясно, хотя возможно произошло снижение массы.
- Шельфовые ледники становятся тоньше, а некоторые тают.

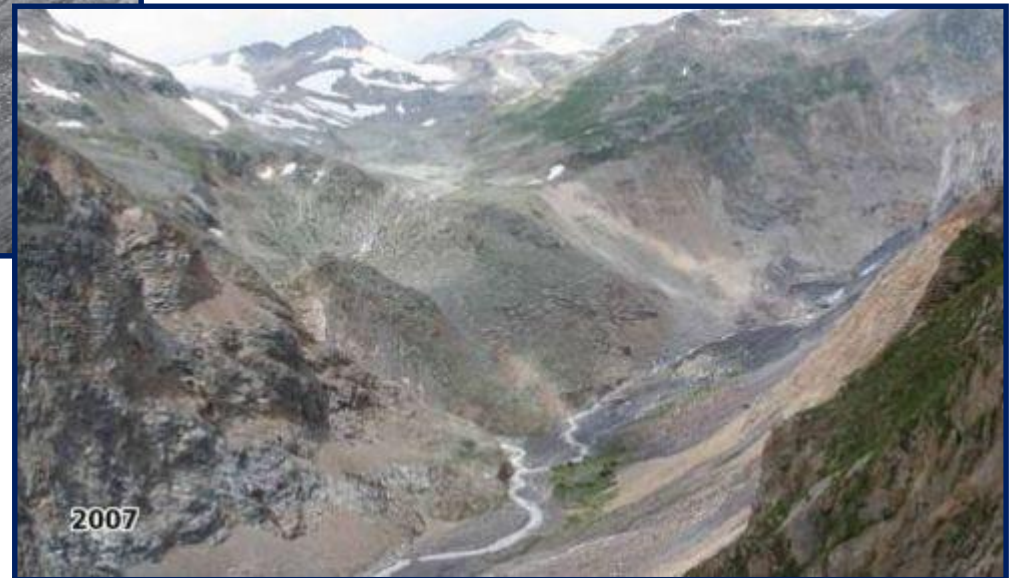
Антарктика: последние изменения

Последствия изменения климата: таяние ледников

Ледник Большой Азау, Эльбрус, Россия



август 2007 г.



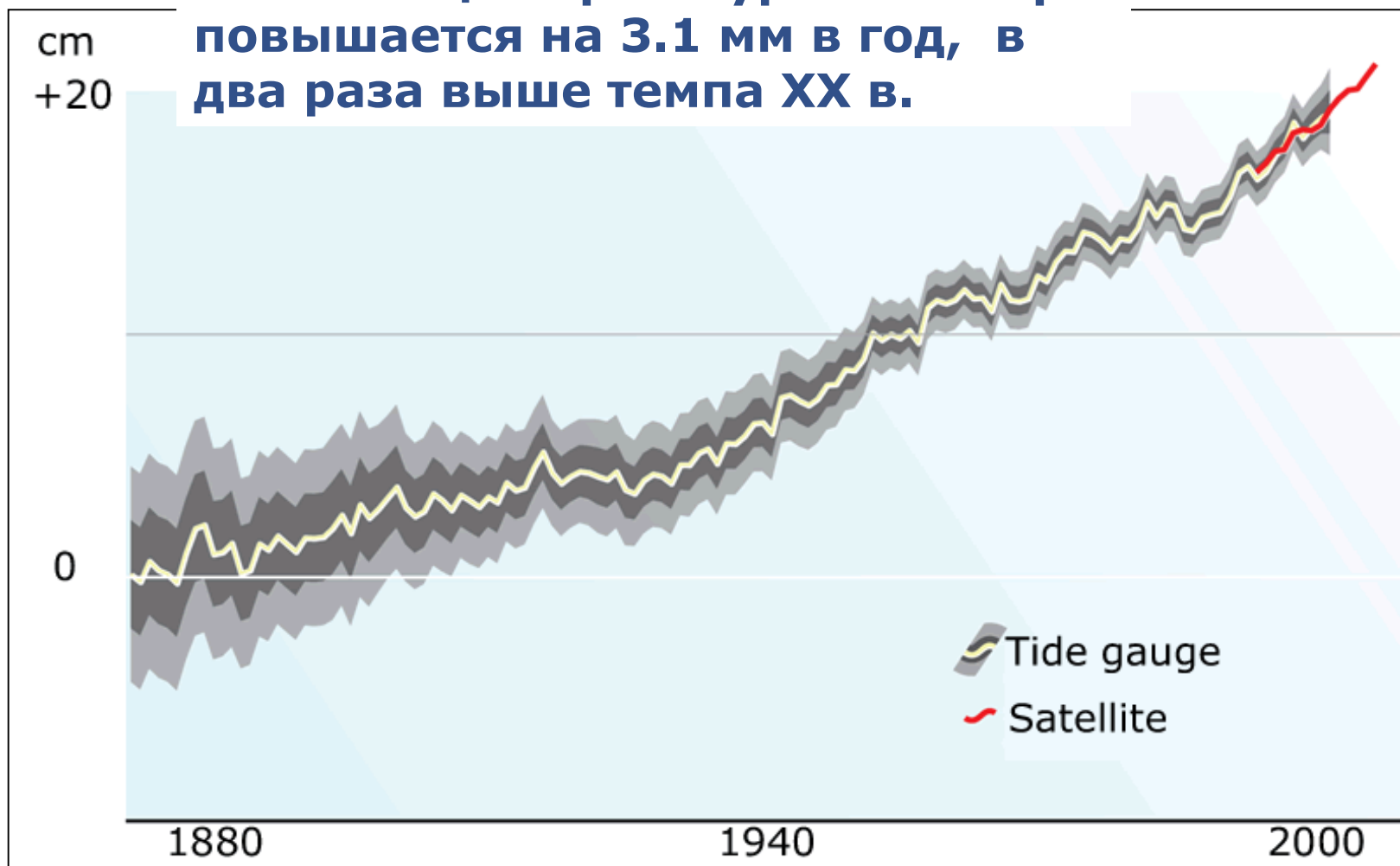
август 1958 г.



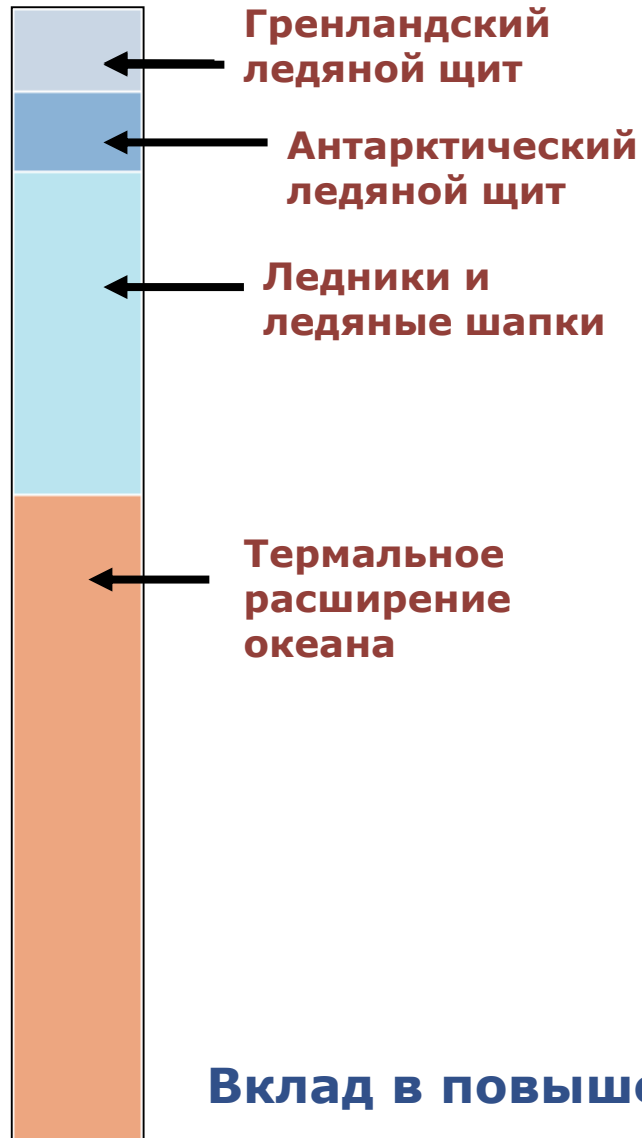
Источник: Географический факультет МГУ, РРЭЦ

Последствия изменения климата: изменение уровня моря

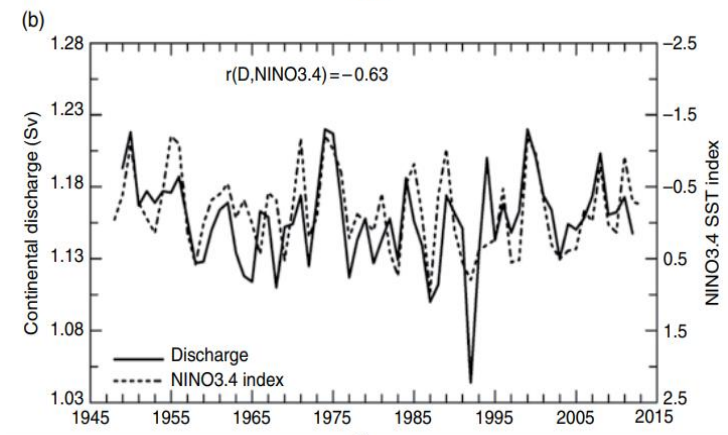
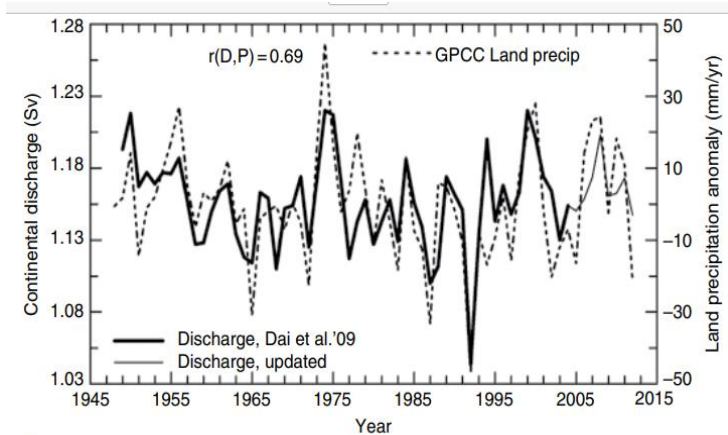
В настоящее время уровень моря повышается на 3.1 мм в год, в два раза выше темпа XX в.



Повышение уровня моря: перспектива

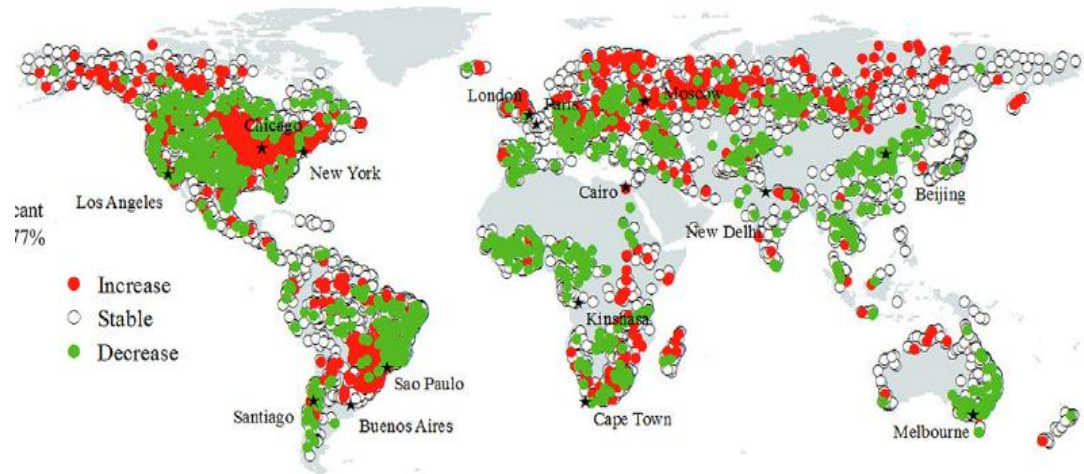


Повышение уровня моря от талых вод по прогнозам может ускориться вследствие увеличения таяния льда на суше.



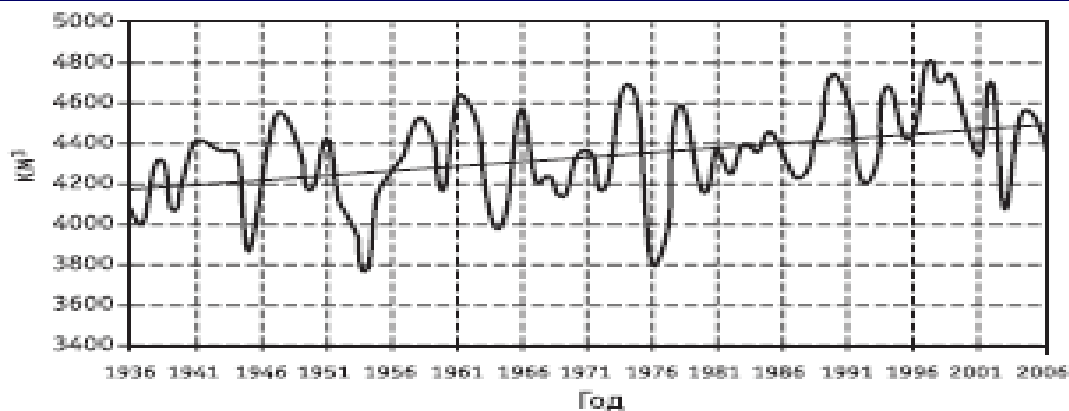
Пунктирная линия - среднее количество осадков за октябрь-сентябрь, усредненное по всему миру (60° S- 75° северной широты)

Суммарные водные ресурсы суши суммарного континентального стока за октябрь-сентябрь ($1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, за исключением стока из Гренландии и Антарктиды) за **1949-2004** годы (толстая сплошная линия), рассчитанные на основе данных наблюдений за стоком **925 крупнейших рек мира** из [Dai et al., 2009], и за 2005-2012 годы (тонкая сплошная линия) по данным на основе обновленных данных о стоке **264 крупнейших рек мира**.

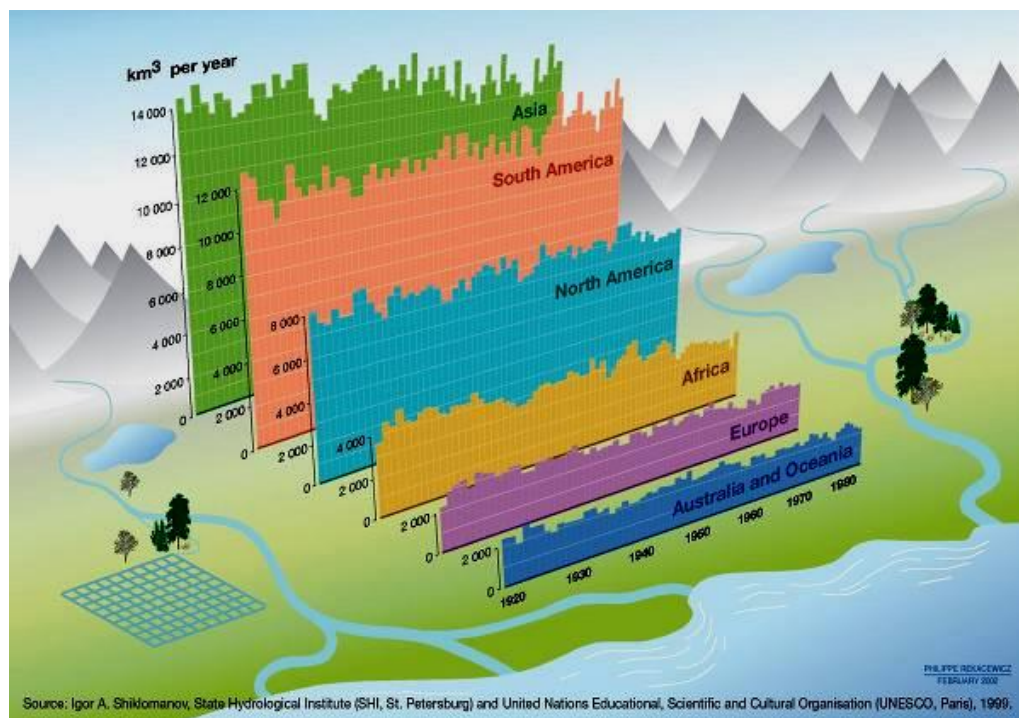


Наблюдаемые изменения речного стока (8089 гидрологических постов на 4307 реках) (Li et al., 2020 – **с участием авторов**)

Последствия изменения климата: изменение речного стока



Многолетняя (1936-2006 гг.) динамика водных ресурсов Российской Федерации



Период обновления воды в некоторых водных объектах [по данным ГГИ, 2008]

Водный объект	Объем воды, тыс. км³	Период обновления, годы (дни)
Мировой океан	1 338 000	2500
Полярные льды	25 780	9700
Горные ледники		1600
Подземные воды	23 400	1400
Подземный лед зоны вечной мерзлоты		10000
Озера	176	17
Реки	2	(16)
Влага в атмосфере	13	(8)

Пример расчета для Онежского озера

Реки приносят до 74 % приходной части водного баланса (15,6 км³ в год), 25 % (5,2 км³/год) приходится на атмосферные осадки.

84 % расходной части водного баланса приходится на сток из озера по реке Свирь (в среднем 17,6 км³ в год), 16 % — на испарение с водной поверхности (3,2 км³/год).

Объем озера - 285 км³

Сумма приходных составляющих = сумма расходных составляющих = 20,8 км³/год

Коэффициент водообмена = 0,073

Период водообмена = 13,7 лет



$$K_B = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^P \Pi_i = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N P_j$$