



**VIII Всероссийский объединенный метеорологический и
гидрологический съезд**

Воздух, вода и устойчивое развитие

Санкт-Петербург, 30 октября 2024 г.

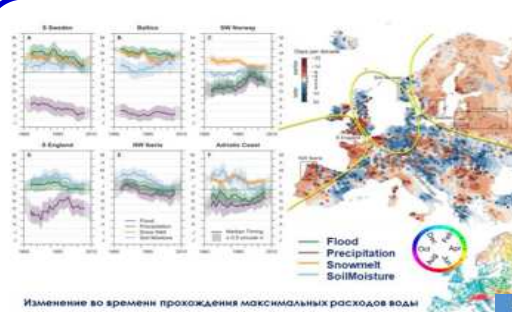
Влияние изменения климата на водный режим рек России в начале 21 века

Н.А.Фролова

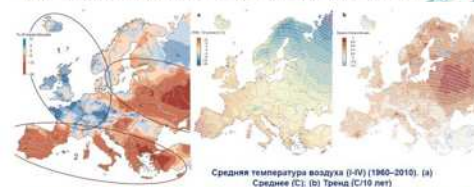
**Кафедра гидрологии суши географического факультета МГУ
имени М.В.Ломоносова**



**Д.В.Магрицкий, В.Ю.Григорьев, М.Б.Киреева,
А.А.Сазонов**



Изменение во времени прохождения максимальных расходов воды



Региональные различия в трендах изменения максимальных расходов в Европе за 1960–2010 гг. Синий цвет – увеличение максимальных расходов воды; красный – уменьшение расходов (% за десятилетия)

- [1] северо-западная Европа: увеличение количества осадков и влажности почвы;
- [2] южная Европа: уменьшение количества осадков и увеличение испарения;
- [3] восточная Европа: уменьшение снеготаяния и более раннее становление снежного покрова

Blösch et al., 2019, Nature: Changing climate both increases and decreases European river floods



Историческое наводнение в Воронежской и Волгоградской области в 2018 г



Река Селенга (основной приток Байкала) в периоды высокого стока и маловодья

Прогнозируемые изменения (речной сток)
«Угрозы водной безопасности возрастут при всех сценариях глобального потепления, но в разной степени (высокая достоверность)»
Прогнозируется, что при глобальном потеплении на 4°C к концу 21 века на 10 % площади суши одновременно вырастут и величины высокого, и низкого речного стока, что затронет более 2,1 миллиарда человек (средняя степень достоверности).

К 2050 году на 42–79% речных водосборов будет достигнут нижний порог экологического речного стока («environmentally critical streamflow»), что окажет негативное воздействие на пресноводные экосистемы этих территорий (средняя степень достоверности).

Вклад изменчивости осадков в изменение речного стока (Li et al., 2020)



Глобальный индекс водной безопасности



Глобальный индекс водной безопасности (GWSI) обобщает показатели ресурсов пресной воды, их доступности для населения, качества воды в системах водоснабжения, защищенности населения от наводнений и эффективности управления водными ресурсами (Garn et al., 2016; Mekonnen and Hoekstra, 2016)

Вклад климатических факторов и антропогенной деятельности в изменение стока (Shi et al., 2019)

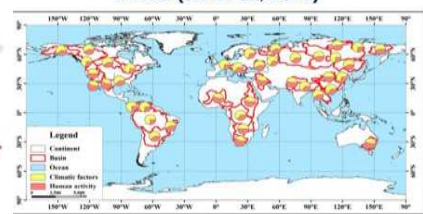


Figure 7. Distribution of the influencing factors of the discharge variation in each basin.

Наблюдаемые изменения речного стока (8089 гидрологических постов на 4307 реках (Li et al., 2020))



Куйбышевское водохранилище в период сработки в мае 2019 г.



Историческое наводнение в бассейне Урала, 2024 г.

Задачи исследования

**Исследование и картографическое отображение
отклика гидрологических систем на
климатические изменения для адаптации
водного хозяйства и обеспечения
экономически эффективного и экологически
безопасного водопользования**

Уравнение водного баланса для речного водосбора

$$R = P - E - (TWS_{\text{кон}} - TWS_{\text{нач}})$$

P - осадки

E - испарение

$TWS_{\text{кон}}$

влагозапасы
на конец
периода

$TWS_{\text{нач}}$

влагозапасы
на начало
периода

R - речной сток

Анализируемые данные

- данные о расходах воды (из гидрологических ежегодников и кадастровых справочных изданий УГМС) - **698 постов !!!**, в том числе для Европейской части России - **361 пост** (по максимальным расходам – **575 постов**) - с 1950 по 2020 гг. (продолжительностью наблюдений ≥ 55 лет)
- реки с отсутствием или минимальным влиянием антропогенной деятельности на режим стока

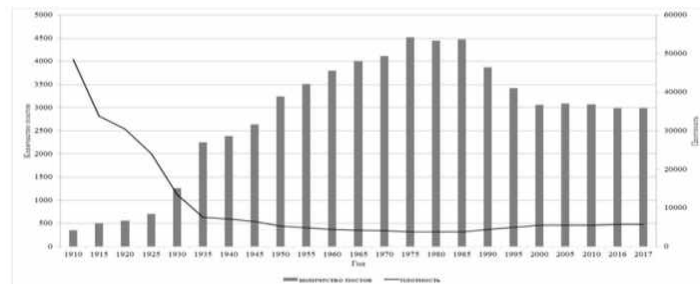
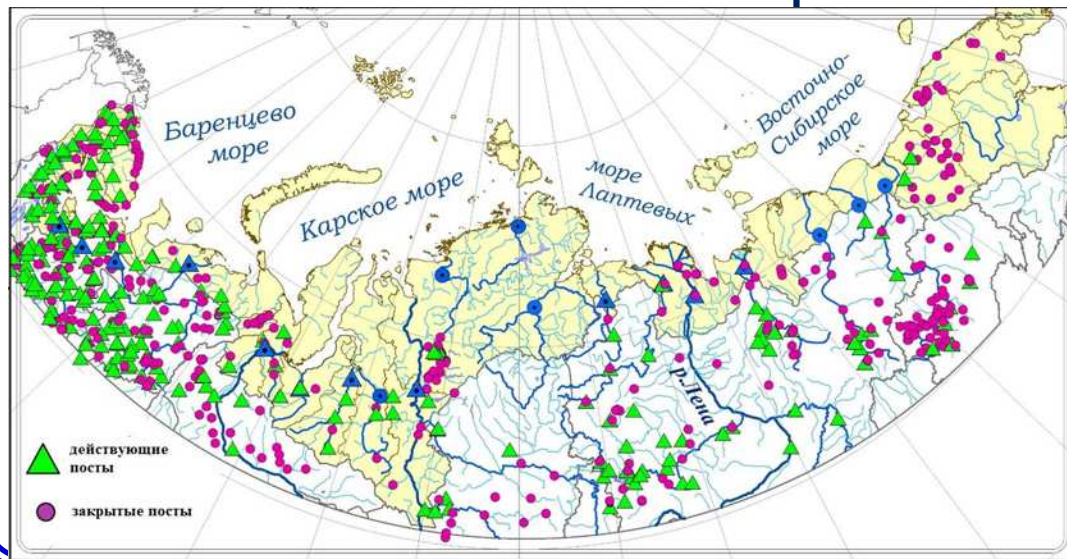
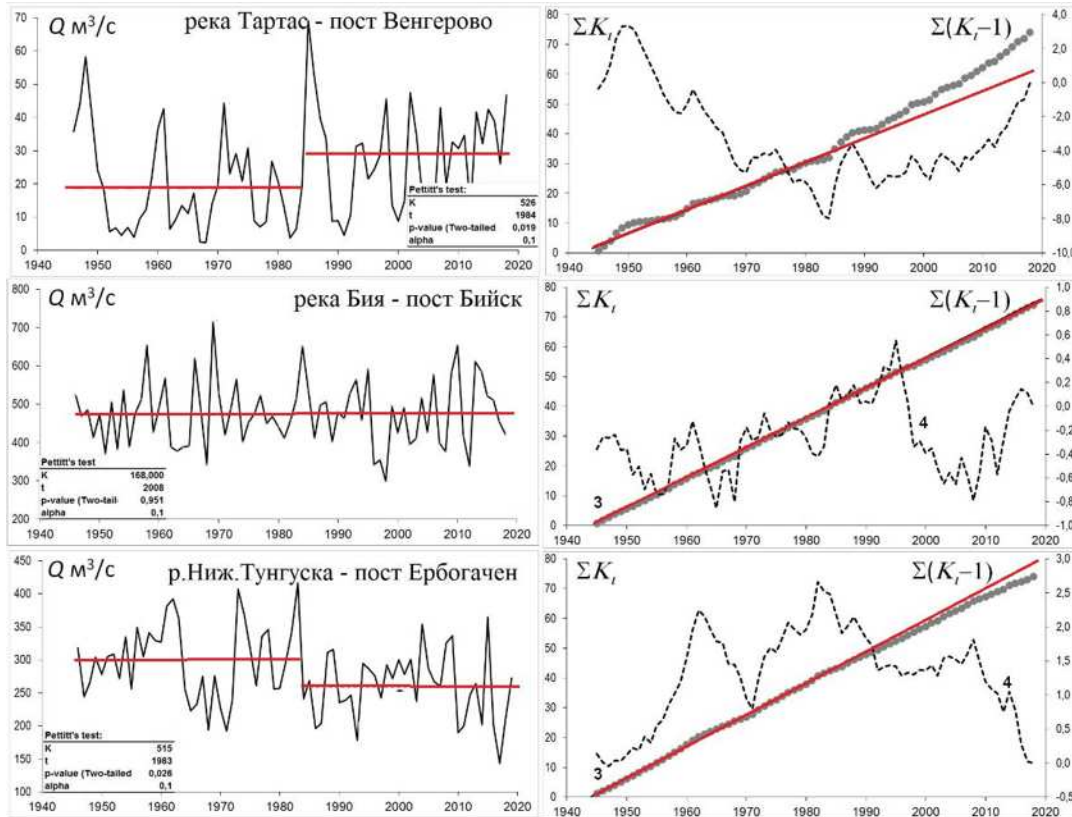


Рис. 1. Динамика численности гидрологической сети РФ за период 1910 - 2017 годы

Количество гидрологических постов в России сократилось по сравнению с 1975 годом на треть, в Сибири и на Дальнем Востоке – почти в 2 раза (Кучеренко и др., 2019)

Выявление изменений в рядах стока и метеорологических факторов

Выбор расчетных периодов

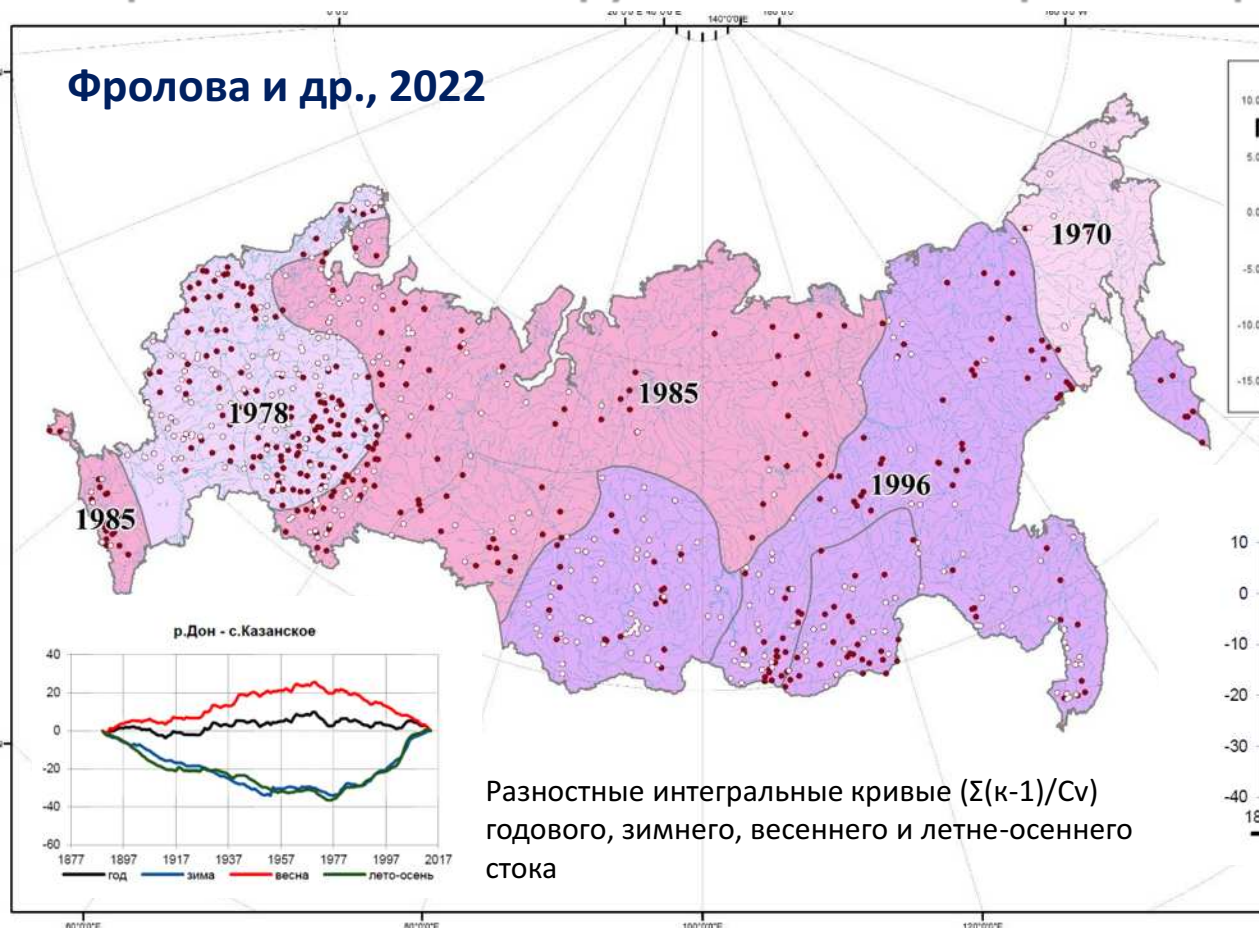


Определение «переломного года» для случая увеличения, отсутствия изменения и уменьшения годовых расходов воды:

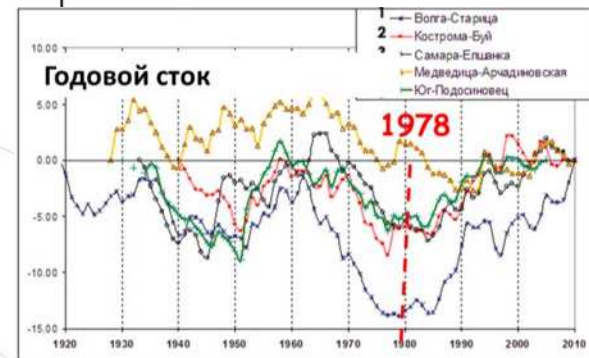
- Слева момент нарушения определен с помощью Pettitt's test,
- Справа – с помощью интегральных ΣK_i и разностных $\Sigma(K_i - 1)$ интегральных кривых $\Sigma(K_i - 1)$

Распределение даты нарушения стационарности в рядах годового стока

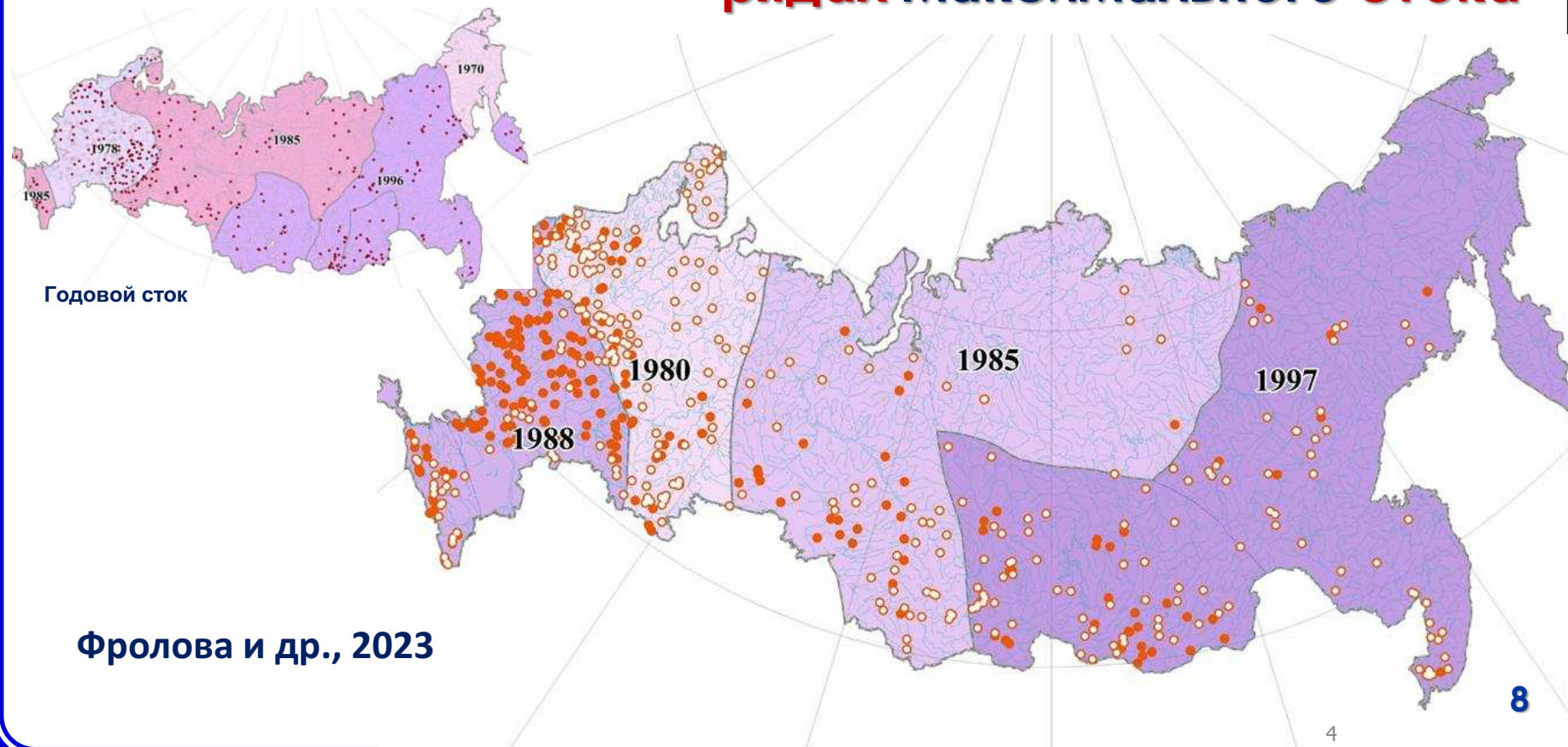
Фролова и др., 2022



Разностные интегральные кривые ($\Sigma(\kappa-1)/C_v$) годового, зимнего, весеннего и летне-осеннего стока

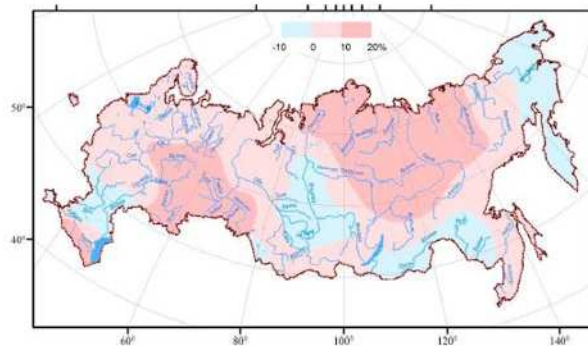


Распределение даты нарушения стационарности в рядах максимального стока



Характер изменений водных ресурсов рек России

Изменение годового стока

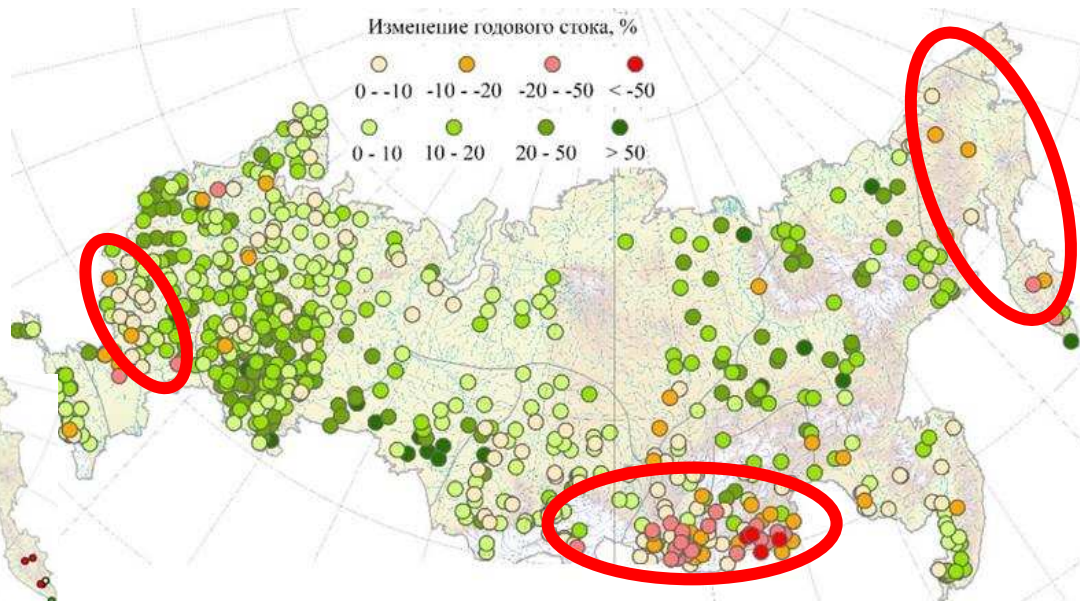


Многолетние колебания..., 2021
Данные ГГИ

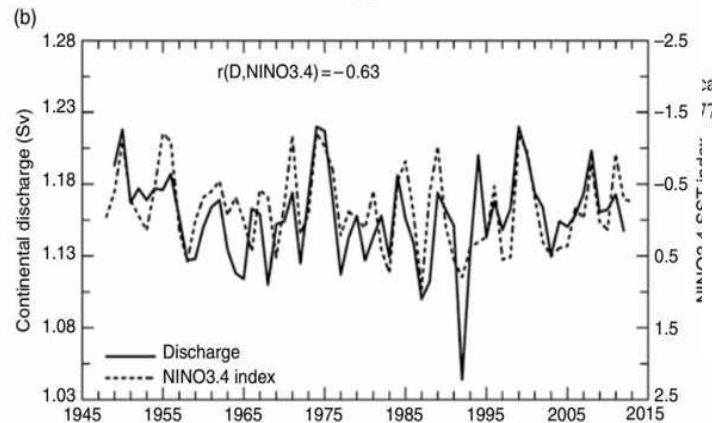
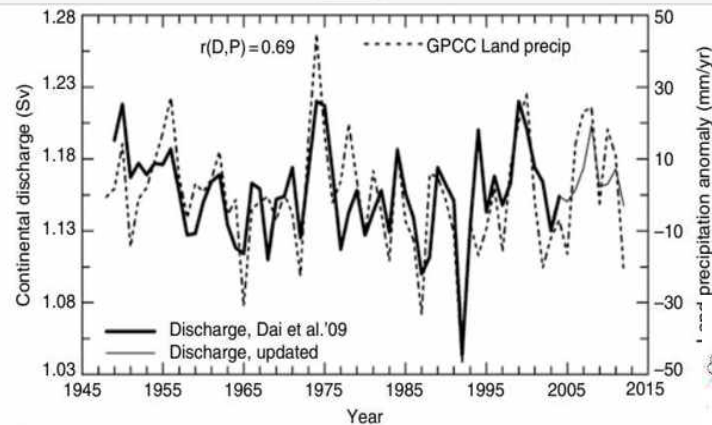


Фролова и др., 2022

Оценка статистической значимости изменений годового стока по критерию Стьюдента для $p\text{-value} < 5\%$

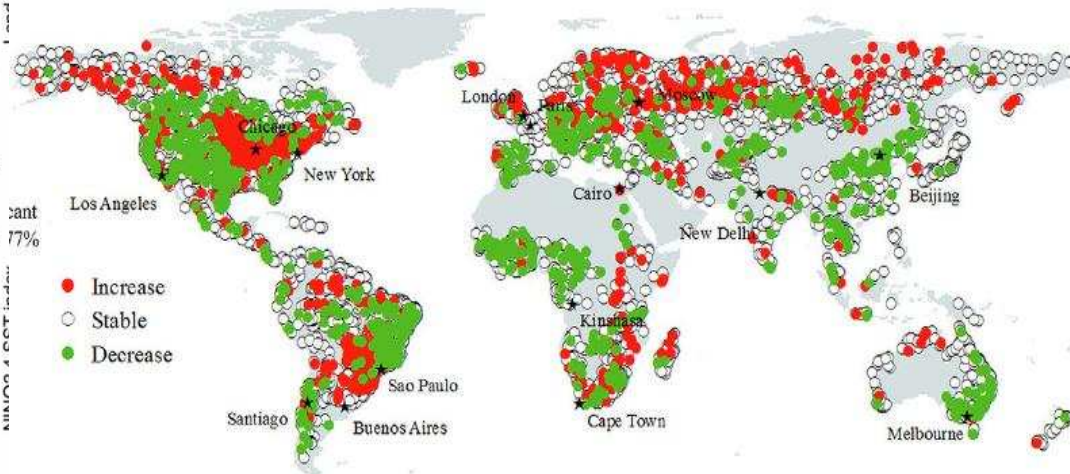


Изменение годового стока (%) относительно базового периода



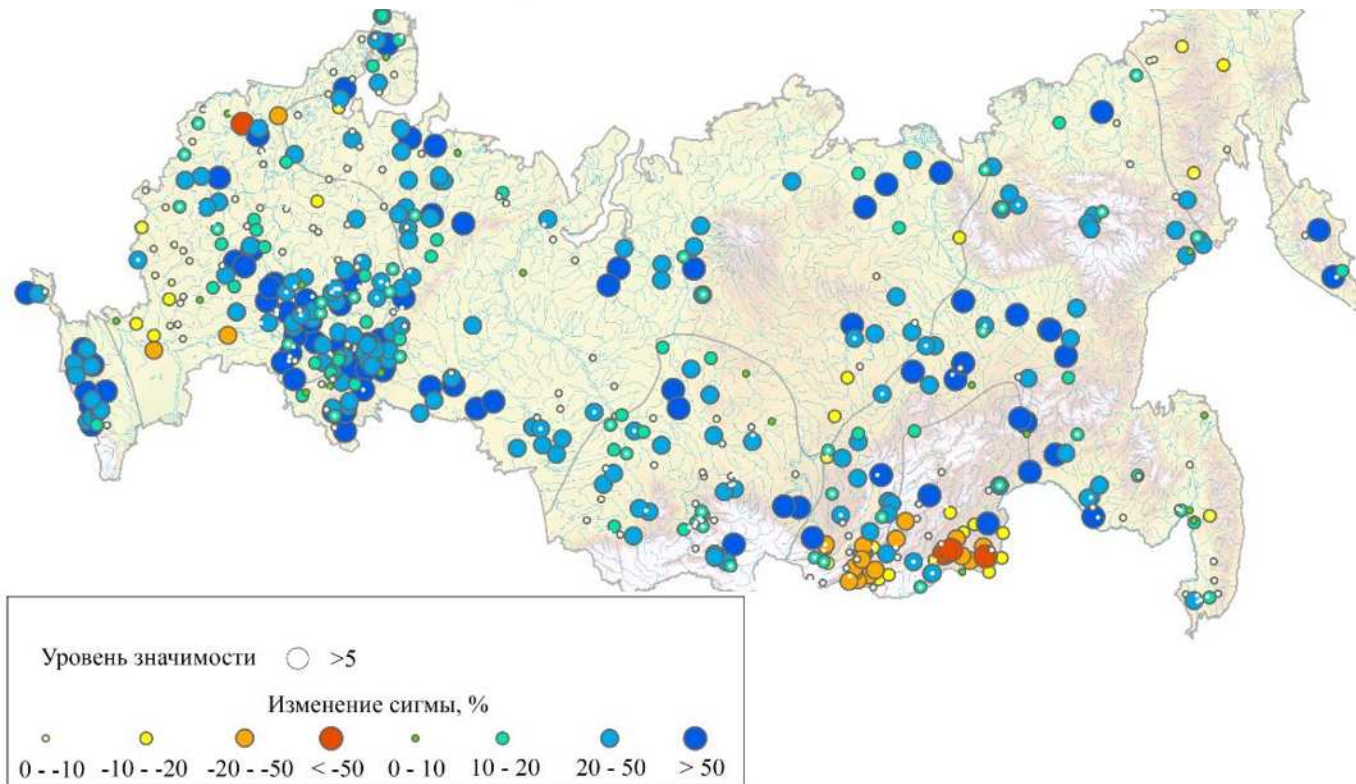
Пунктирная линия - среднее количество осадков за октябрь-сентябрь, усредненное по всему миру (60°S-75°северной широты)

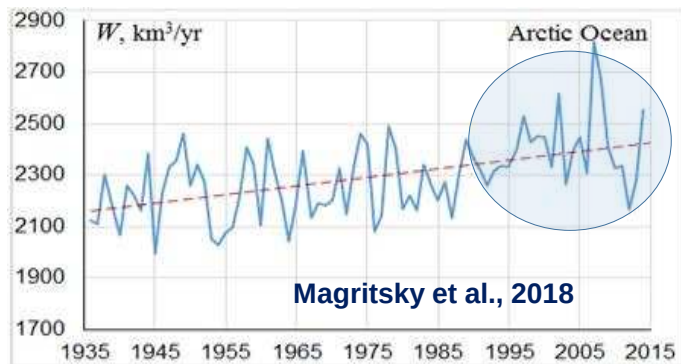
Суммарные водные ресурсы суши суммарного континентального стока за октябрь-сентябрь ($1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, за исключением стока из Гренландии и Антарктиды) за **1949-2004 годы** (толстая сплошная линия), рассчитанные на основе данных наблюдений за стоком **925 крупнейших рек мира** 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)

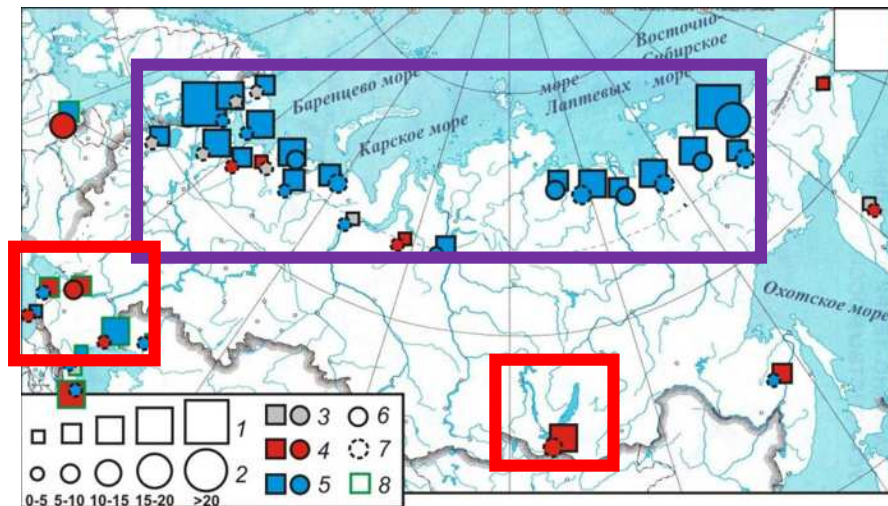
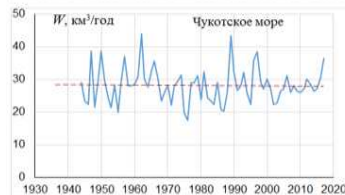
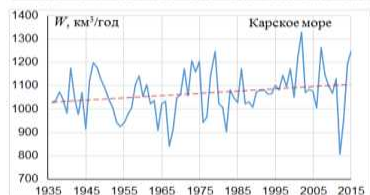
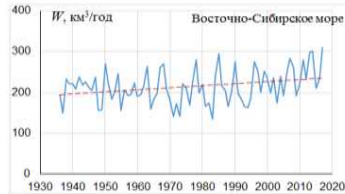
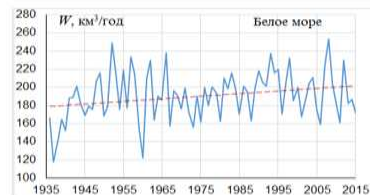
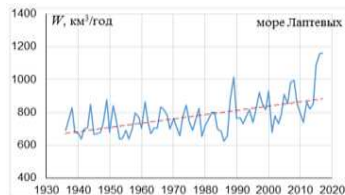
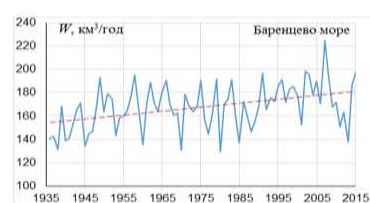
Изменение среднего квадратического отклонения рядов годового стока





Многолетние колебания притока речных вод в арктические моря РФ

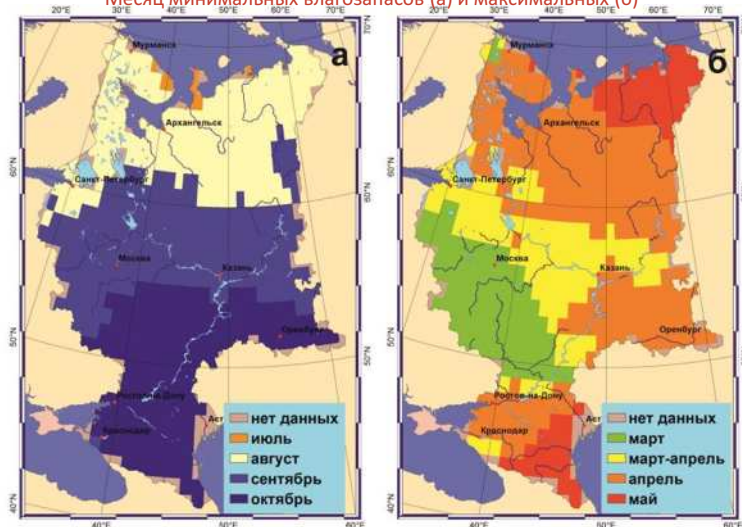
- Увеличение притока речных вод наблюдается со второй половины 1980-х гг.
- Увеличение превысило 7% (в 1986-2015 гг., по сравнению с 1936-1985 гг.).
- Исключение составили реки водосбора Чукотского моря.



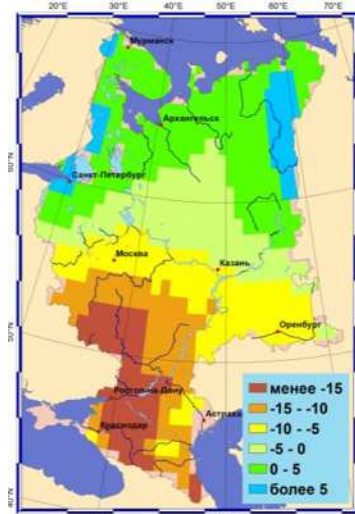
1 – относительная величина превышения стока в 1976–2015 гг. в сравнении с величиной за 1936–1975 гг. (%); 2 – величина линейного тренда за 1976–2015 гг. (в % величины за 1936–1975 гг. и за 10 лет); 3 – изменения незначительные ($-1\% < x < 1\%$); 4 – уменьшение, 5 – увеличение; 6 – тренд статистически незначим; 7 – тренд статистически значим; 8 – влияние водохозяйственной деятельности на многолетние изменения характеристики стока

Сезонный ход влагозапасов

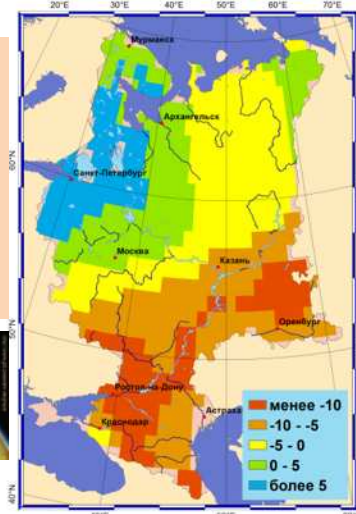
Месяц минимальных влагозапасов (а) и максимальных (б)



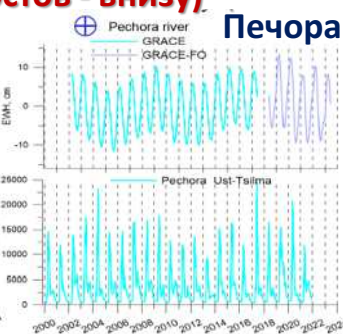
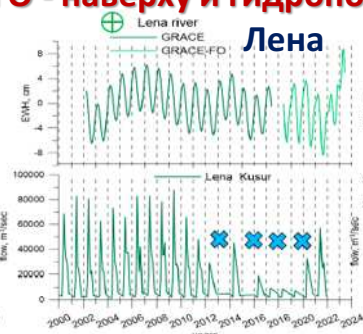
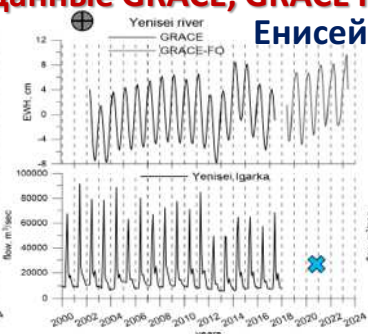
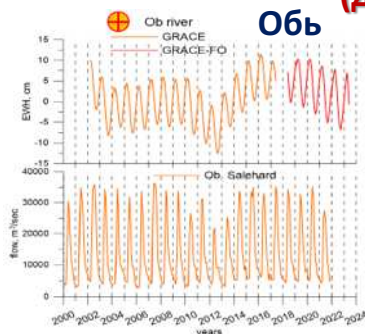
Динамика бассейновых влагозапасов за 2002-2015 гг.



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



Изменение месячных влагозапасов для крупнейших бассейнов России (данные GRACE, GRACE FO - наверху и гидропостов - внизу)



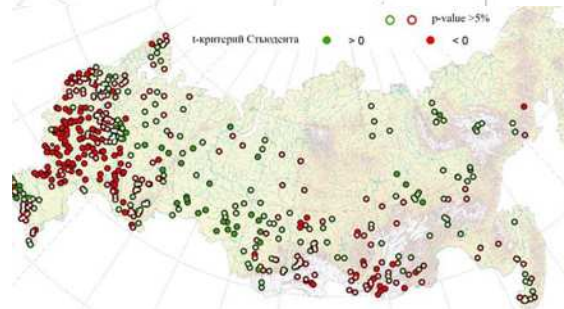
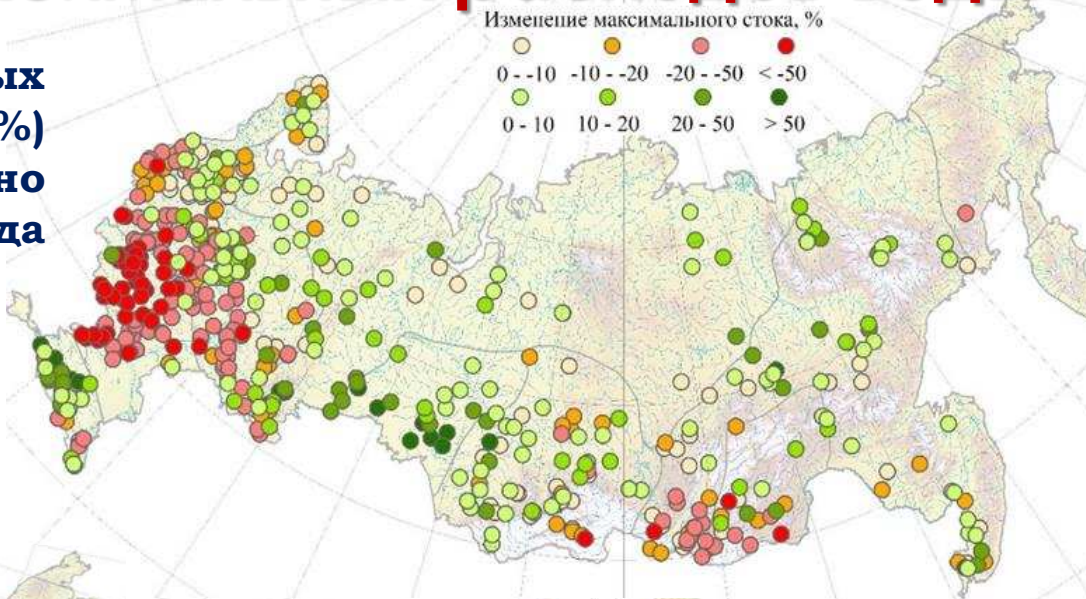
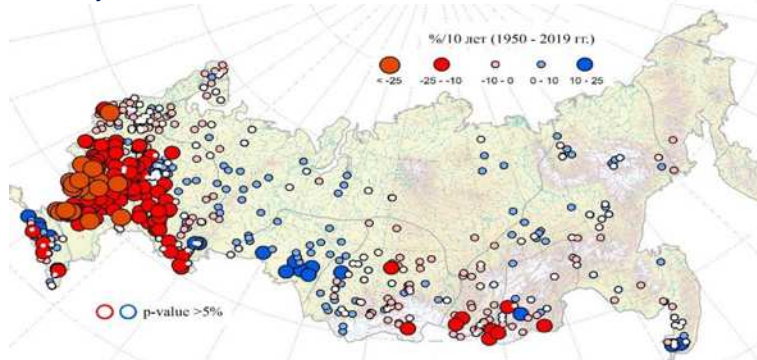
**Характер изменений
элементов водного режима
рек России**

Изменение максимальных расходов воды

**Изменение максимальных
расходов воды (%)
относительно
базового периода**

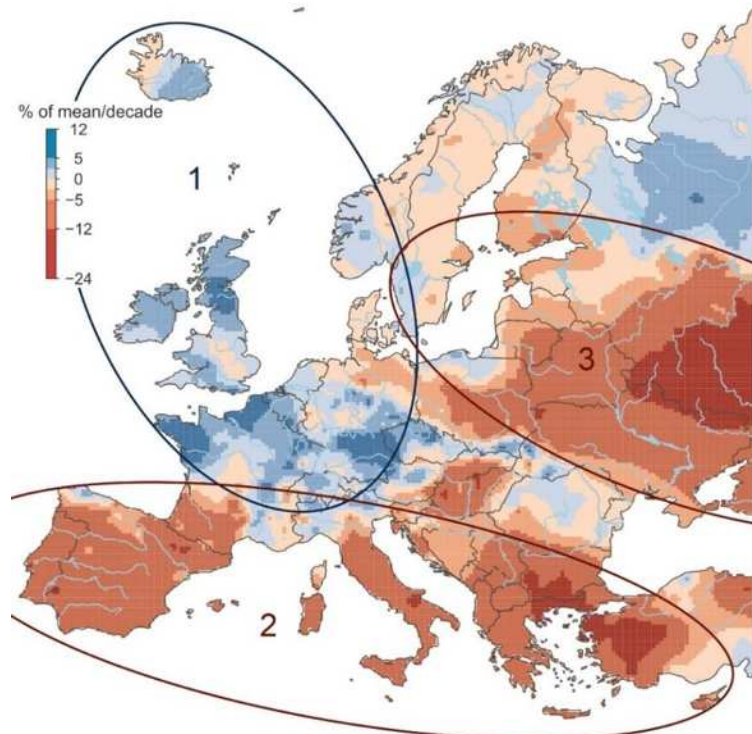
**Величина трендов (%/10 лет)
за 1950-2019 гг.**

с указанием их статистической значимости



**Оценка
статистической
значимости
изменений
максим. расходов
по критерию
Стьюдента**

Изменения максимальных расходов воды в Европе



Различия в трендах изменения максимальных расходов в Европе за 1960-2010 гг

синий цвет – увеличение максимальных расходов воды;

красный – уменьшение расходов (% за десятилетие)

[1] северо-западная Европа: увеличение количества осадков и влажности почвы;

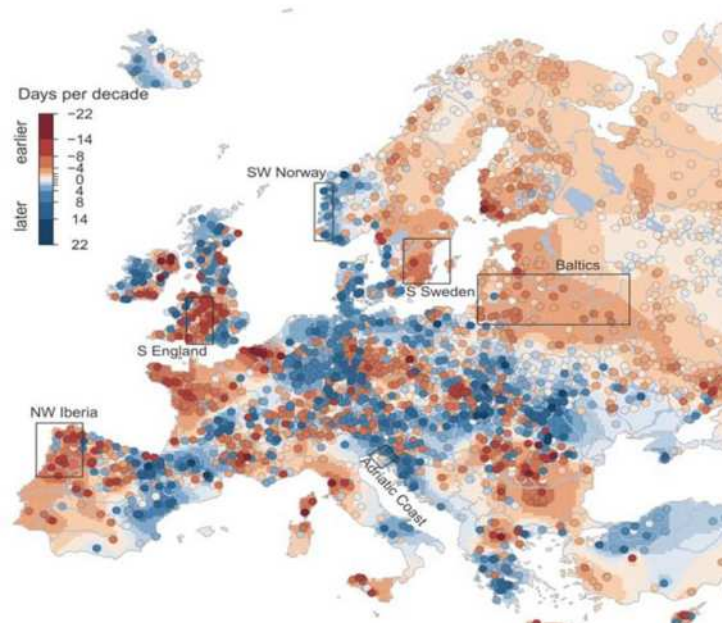
[2] южная Европа: уменьшение количества осадков и увеличение испарения;

[3] Восточная Европа: уменьшение снеготавления и более раннее таяние снежного покрова

Изменение во времени прохождения максимальных расходов воды

синий цвет – наблюдаются позднее;

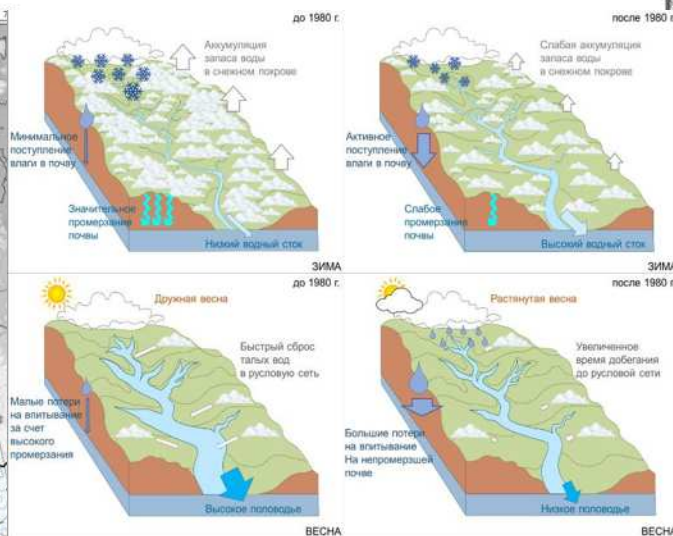
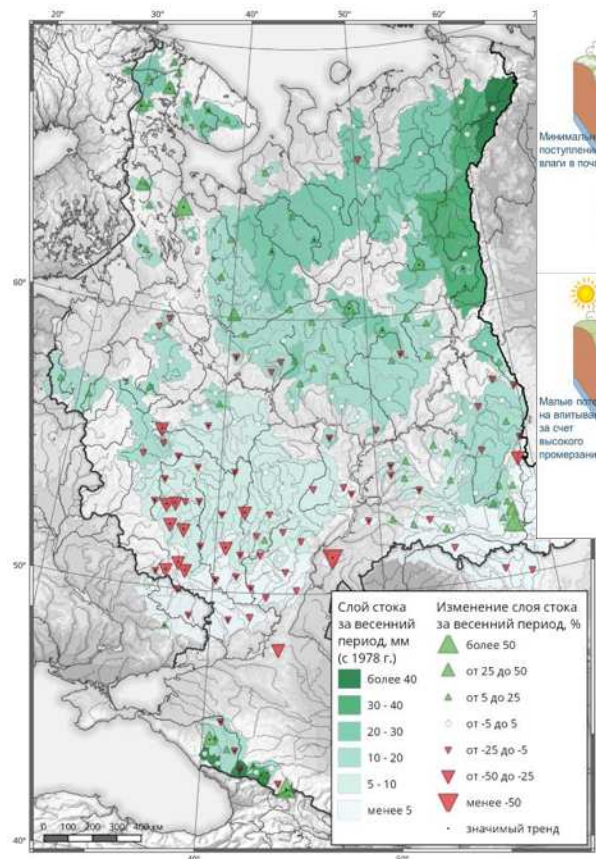
красный – проходят раньше



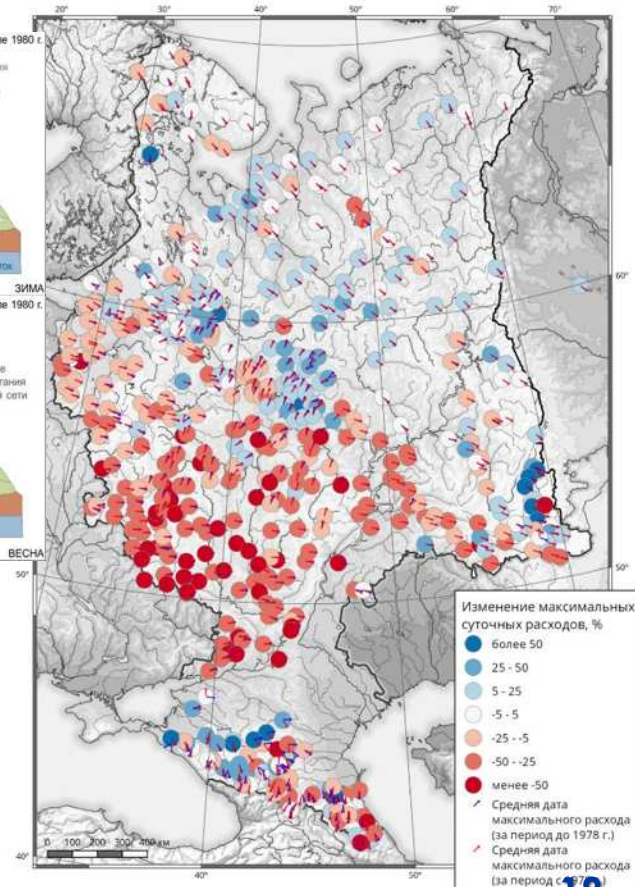
Blöschl et al., 2017, 2019 – с участием авторов

Изменение слоя стока за
весенний период, %

Изменение весеннего стока



**Принципиальные отличия
условий формирования
стока весеннего половодья
до и после начала
современного изменения
климата**



Изменение максимального расхода половодья

Динамика сроков прохождения половодья на р. Битюг – г. Бобров

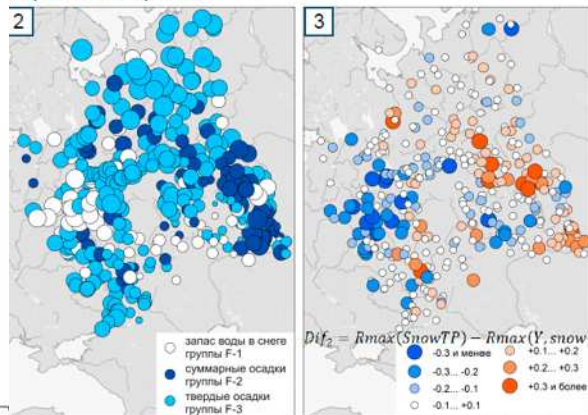
Многолетняя
динамика среднего
слоя стока воды за
весеннее половодье в
пределах ЕТР в 1980–
2017 гг. (1 –
фактически
наблюдаемый сток,
2 – пятилетнее
скользящее среднее,
3 – линия тренда для
фактических данных)



Изменение характеристик и факторов формирования весеннего стока

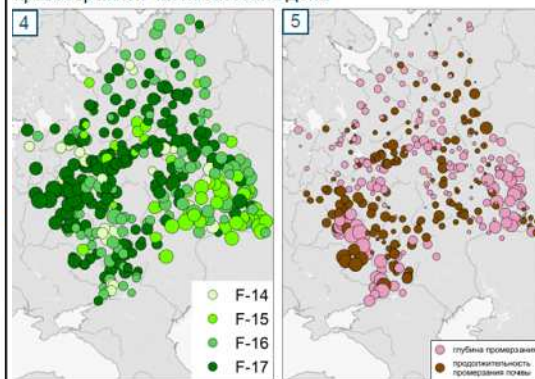
Запас воды в снежном покрове не является исключительным приходным ФФС

Для большей части ЕТР главным приходным ФФС выступает сумма осадков, выпадающих при отрицательной температуре воздуха (62 %), сумма осадков за зимний период (26 %) и запас воды в снежном покрове (12 %) (2). Теснота связи стока со снегозапасом и стока с суммой зимних осадков (TPsum) незначительна в 51% случаев, а для стока и суммы осадков холодного периода (SnowTP) — лишь в 25% случаев (3). Области более значимого доминирования того или иного параметра образуют ярко выраженные ареалы

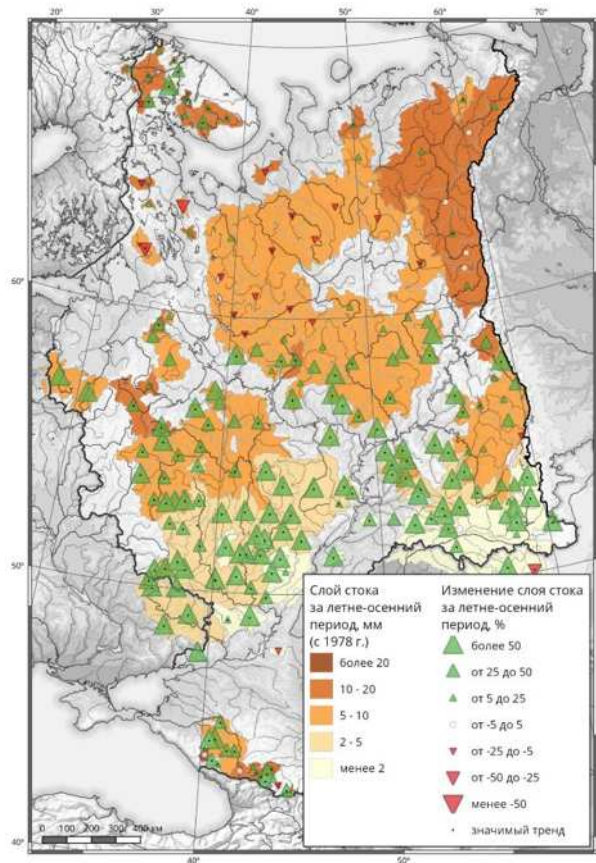


Влажность и глубина промерзания почвы могут выступать главным ФФС

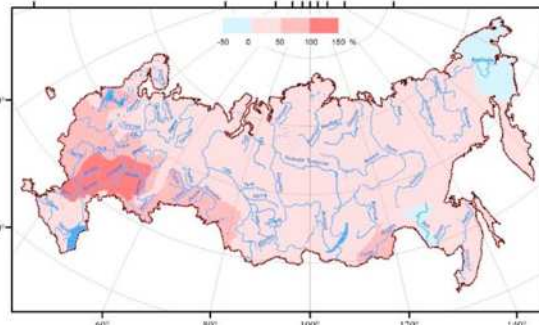
Влажность почвы перед началом зимы как более значимый ФФС выступает лишь для 24% водосборов, тогда как на максимальную влажность — 46% (4). При этом выявлен ареал значимой летней влажности почвы (7%). Промерзание почвы в качестве ФФС выступает не только в виде глубины, но и продолжительности явления (45% водосборов) (5). При этом сопоставление ее со скоростью таяния снежного покрова ставит под сомнение ее первенство даже в центральной части ЕТР. Главным ФФС влажность почвы выступает в бассейнах Нижней Волги, Нижней Камы и р. Белая, а также рр. Хопер и Урал в верхнем течении, а глубина промерзания — в правобережной части бассейна Дона



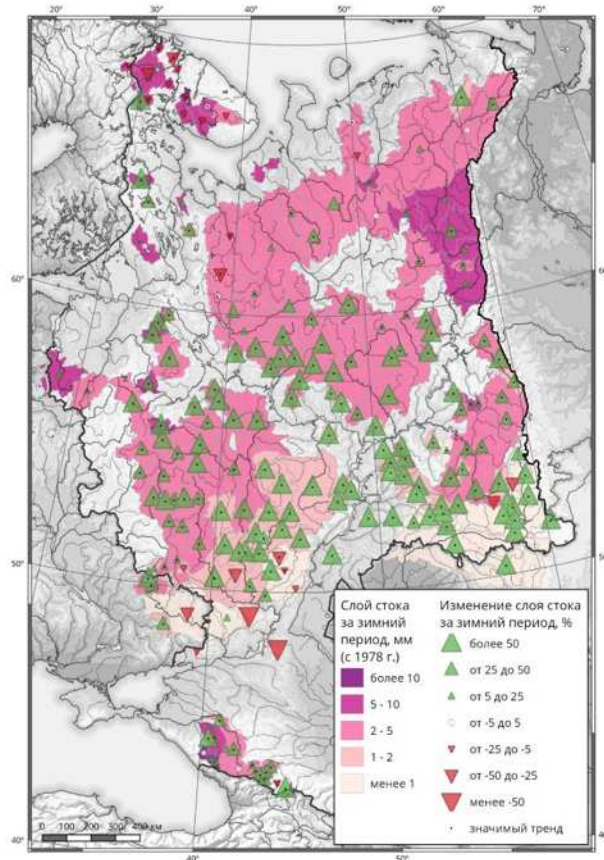
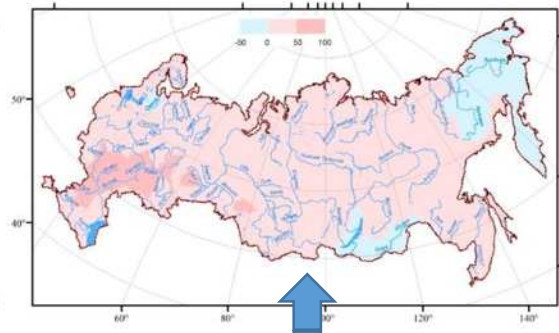
Изменение меженного стока



Летне-осенний сезон



Карта-схема изменения (%) минимального зимнего стока (вверху) и летне-осеннего стока (внизу) рек РФ в современный период по отношению к предшествующему



Зимний сезон

По данным ГГИ (Многолетние колебания..., 2021)

Изменение стока горных рек с ледниковым питанием

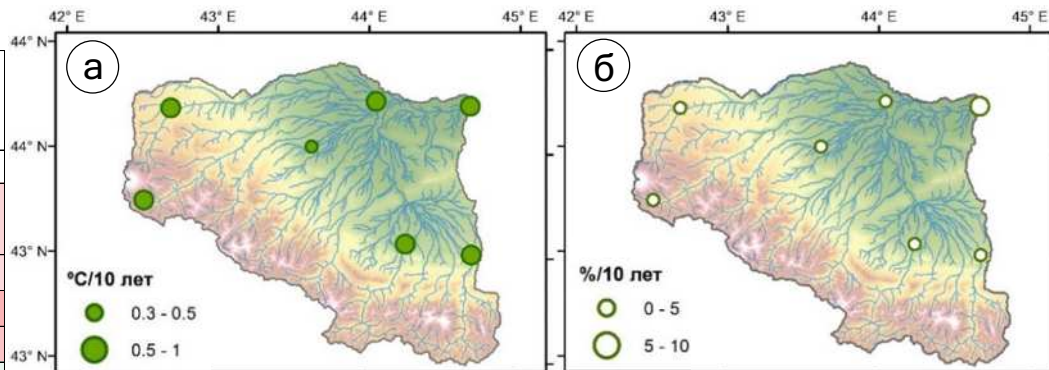
(на примере западной части бассейна р. Терек)

Изменения среднемесячных расходов
по данным гидрометрических створов
в пределах исследуемого бассейна

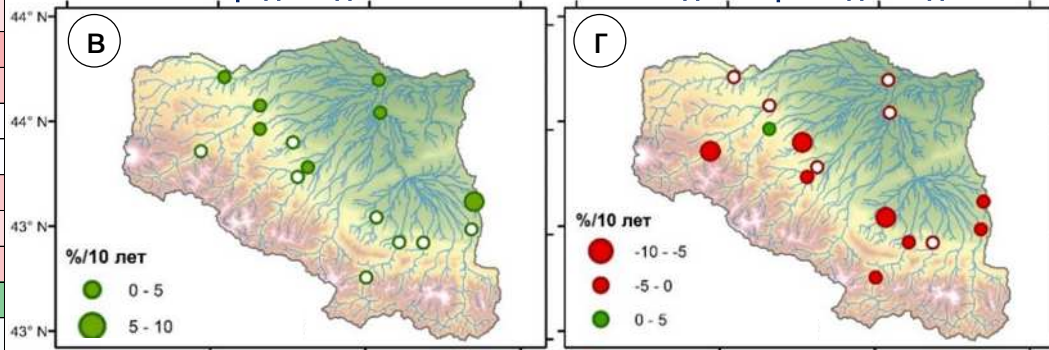
Река - пост	Изменения среднемесячного расхода, %/10 лет			
	Май	Июнь	Июль	Август
Черек Балкарский - с. Бабугент	4.5	1.3	-0.8	-1.8
Черек - пгт Каштатау	7.1	3.0	0.2	-1.4
Баксан - г.Тырныауз	6.0	1.9	-4.0	-4.0
Цей - пгт Бурон	0.6	0.3	-1.9	-2.9
Чегем 1-й - с. Нижний Чегем	8.5	5.9	3.5	1.8
Баксан - с. Заково	5.1	2.6	0.1	-1.1
Малка - ст. Прохладная	7.4	0.8	-1.8	-4.3
Терек - г. Владикавказ	4.0	1.1	-1.2	-3.0
Ардон - с. Тамиск	8.0	1.3	1.0	0.8
Малка - с. Каменноостское	4.4	3.7	1.9	0.9
Терек - ст. Котляревская	1.0	-0.2	-2.1	-2.7
Фиэгдон - с. Тагардон	3.9	4.6	0.5	-1.4
Белая - с. Кора-Урусдон	-5.6	-1.0	-4.7	-2.9
Нальчик - с. Белая речка	-9.2	2.1	3.6	6.8
Камбилеевка - с. Ольгинское	-1.0	0.9	4.6	1.1

Тренды изменения*
годовой суммы осадков

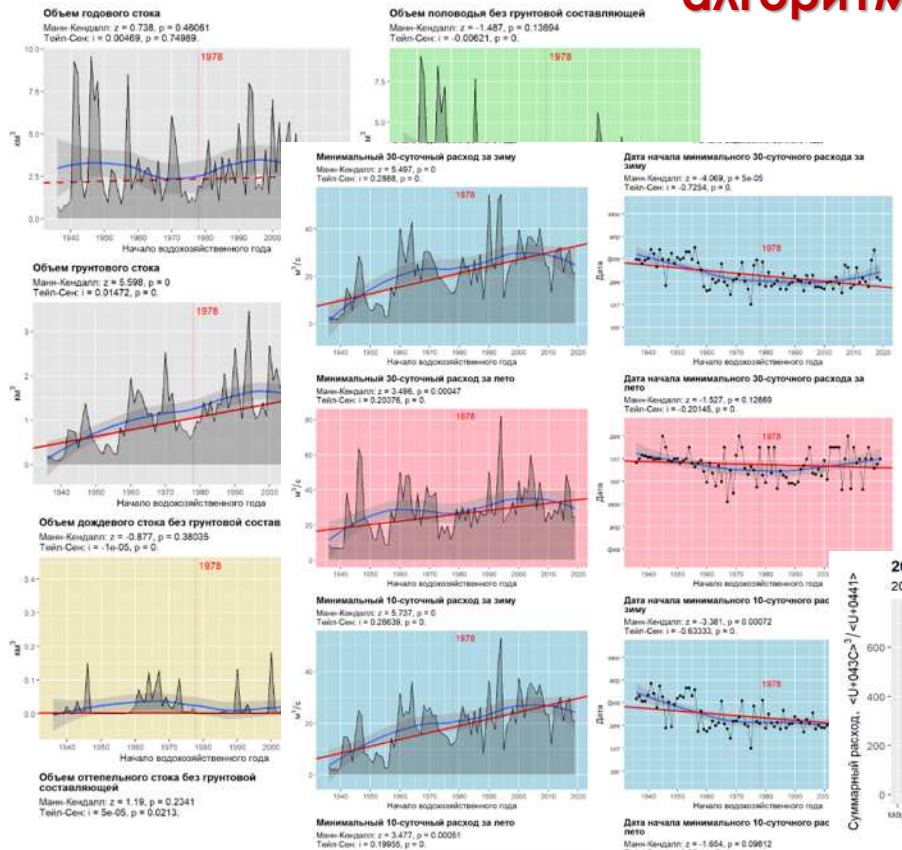
среднегодовой температуры воздуха



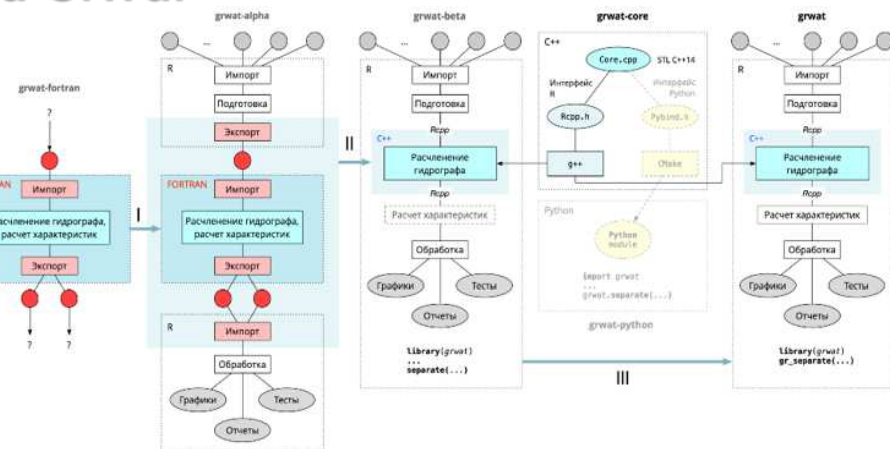
среднегодового и максимального годового расходов воды



Реализация схемы Б.И. Куделина (1967) в виде автоматизированного алгоритма GrWat

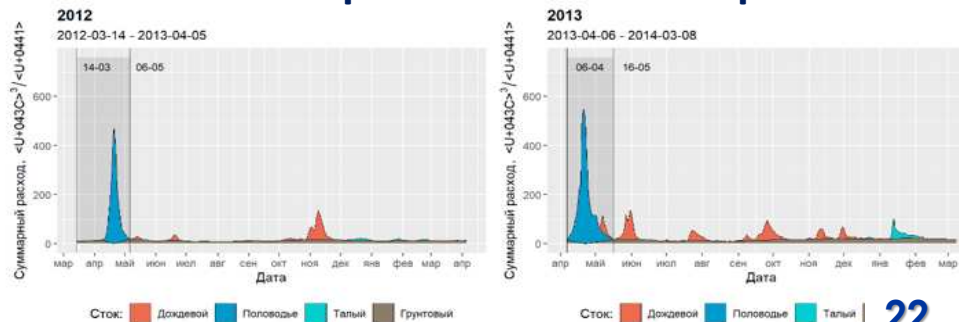


Река Урал – г.Оренбург



Киреева и др., 2018, Kireeva et al., 2020, Рец и др., 2022

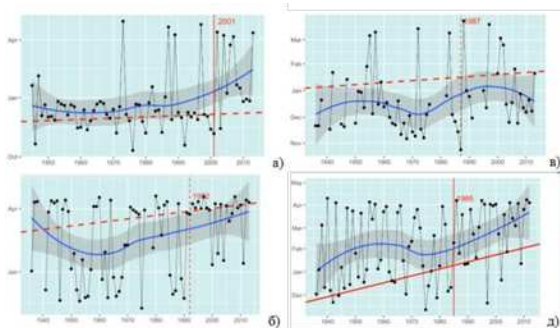
Река Протва – с.Спас-Загорье



Сток: Дождевой Половодье Талый Грунтовой

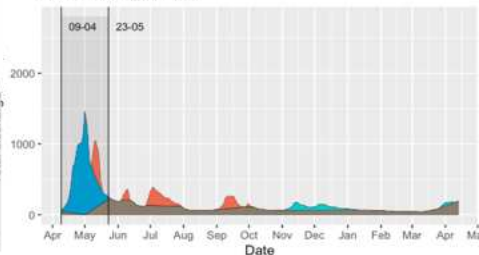
Сток: Дождевой Половодье Талый

Современные особенности прохождения паводков на территории ЕТР



2003

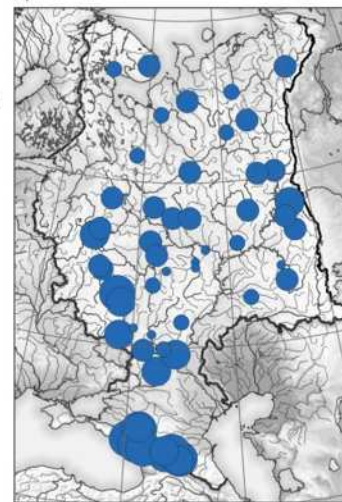
2003-04-09 - 2004-04-13



Discharge: Rain Seasonal Thaw Ground

Дождевые и оттепельные паводки:
количество паводков за год в среднем
за 1978 – 2017 гг.

а)



Количество дождевых паводков
(среднее 1978-2015)



б)



Количество оттепельных паводков
(среднее 1978-2015)

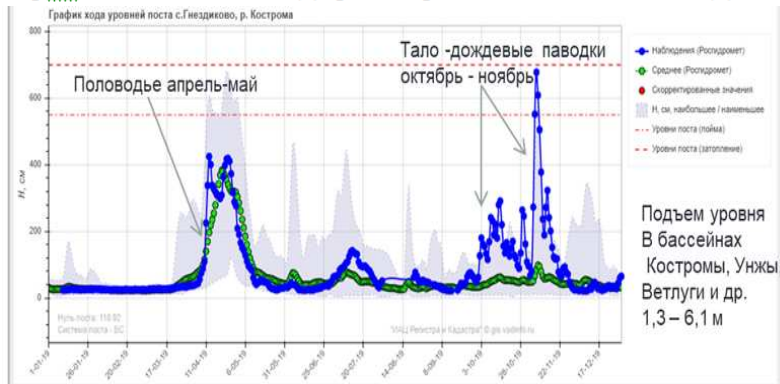


Оттепельные паводки: дата прохождения Q_{max}

р.Северная Двина - с.Усть-Пинега (а) р.Унжа – г. Макарьев (б)

р.Мокша -г.Темников (в), р. Хопер – х. Бесплемяновский (д)

График хода уровней поста с.Гнездиково, р. Кострома



❖ Увеличение доли паводочного стока на 10-30%

❖ Рост дисперсии объемов паводочного стока на 10 - 40 %

❖ Совместное увеличение оттепельных и дождевых паводков

Киреева и др., 2018, Kireeva et al., 2020, Рец и др., 2022

Связь изменений водного режима рек и климата

$$R = P - E - (TWS_{\text{кон}} - TWS_{\text{нач}})$$

R - сток
 P - осадки
 E - испарение

$TWS_{\text{кон}}$
влагозапасы
на конец
периода

$TWS_{\text{нач}}$
влагозапасы
на начало
периода

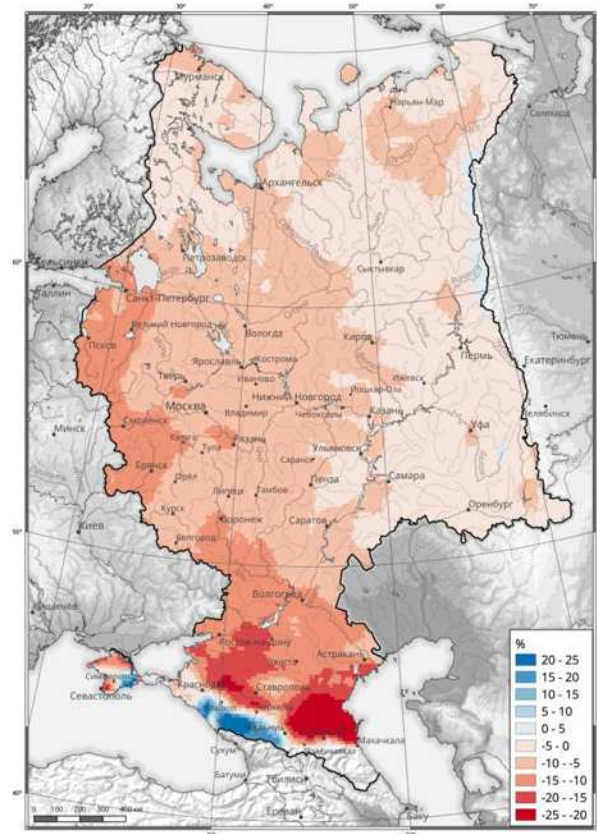
Вызваны ли изменения речного стока изменением климата?

Пример: реки ЕТР

Анализ изменений условий формирования зимнего и весеннего стока – по разнице значений (до и с 1978 г.)

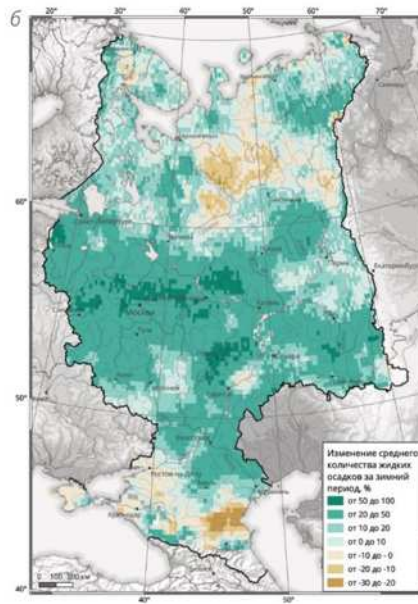
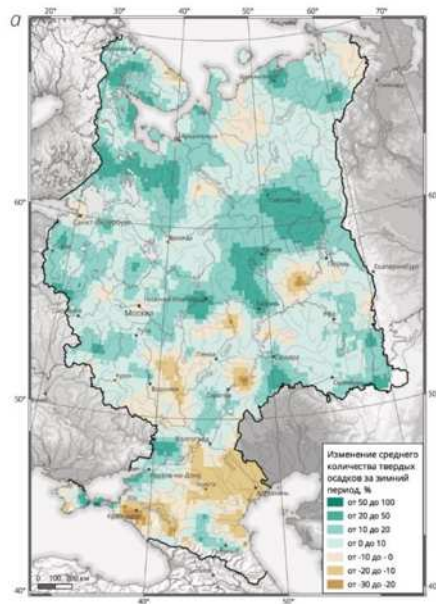
1. Количества дней с отрицательными температурами
2. Сумма жидких осадков за зимний период (начиная с первым переходом через 0°C и заканчивая последним)
3. Сумма жидких осадков за летний период
4. Количества оттепелей (количество переходов через 0°C)
5. Продолжительности зимы (начиная с первым переходом через 0°C и заканчивая последним)
6. Средних температур воздуха за зиму
7. Сумм отрицательных температур
8. Сумма твердых осадков за зимний период
9. Сумма годовых осадков и за отдельные сезоны

По данным реанализов ERA-40 и ERA Interim, проекта E-OBS

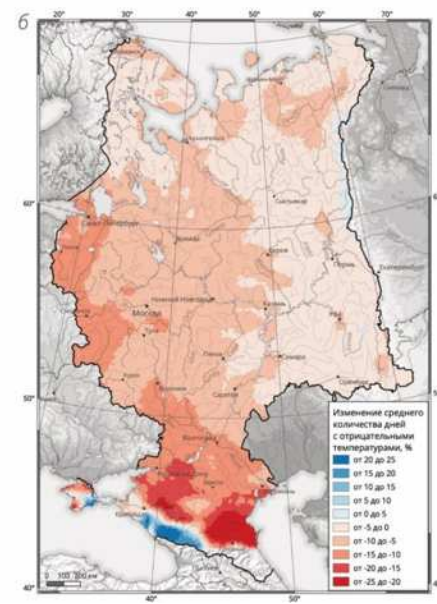
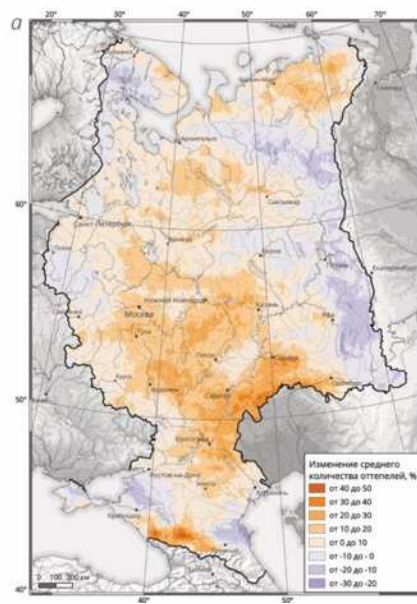


Количество дней с отрицательными температурами

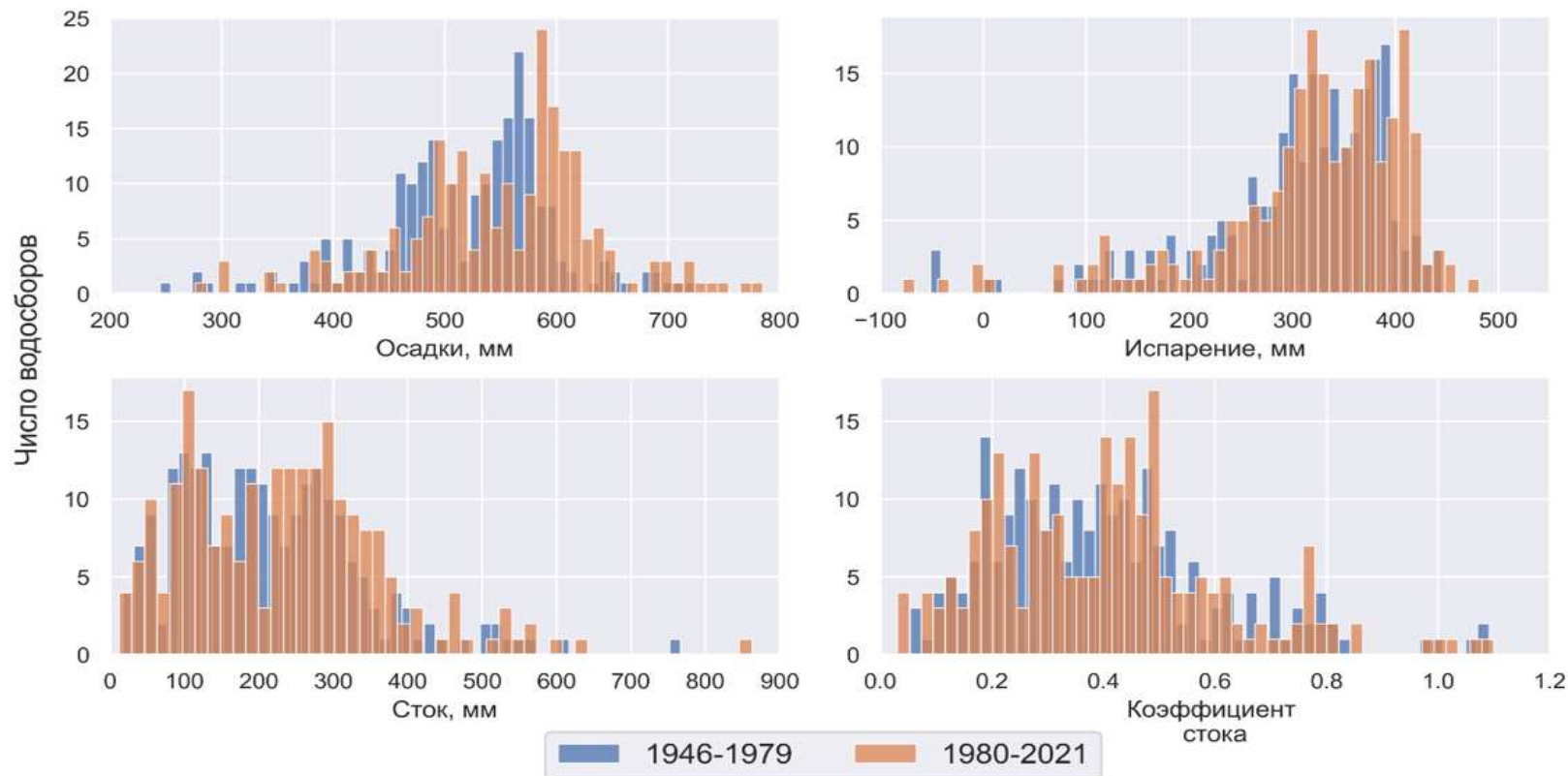
Изменение доли твердых (а) и жидких осадков (б) за зимний период (%)



Изменение количества (а) и продолжительности (б) оттепелей (%)



Изменение водного баланса рек



Медианное значение коэффициента стока **выросло с 0.37 до 0.40**

*севернее 48 с.ш.

Изменение водного баланса рек ЕТР

$$R_i = P_i \times \left[1 + \left(\frac{PET_i}{P_i} \right)^{\omega_i} \right]^{\frac{1}{\omega_i}} - PET_i$$

Модифицированное уравнение
Будыко (например, Gan et al., 2021)

i – индекс периода

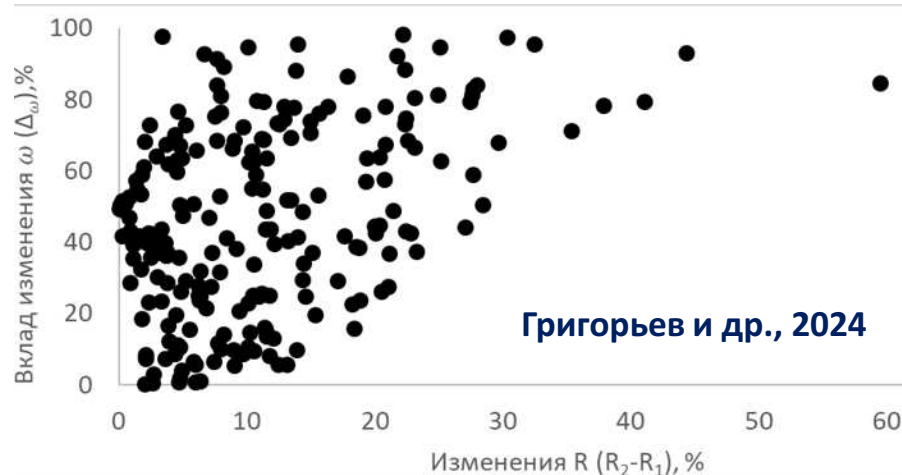
R – речной сток

P – осадки

PET – испаряемость

ω – эмпирический параметр

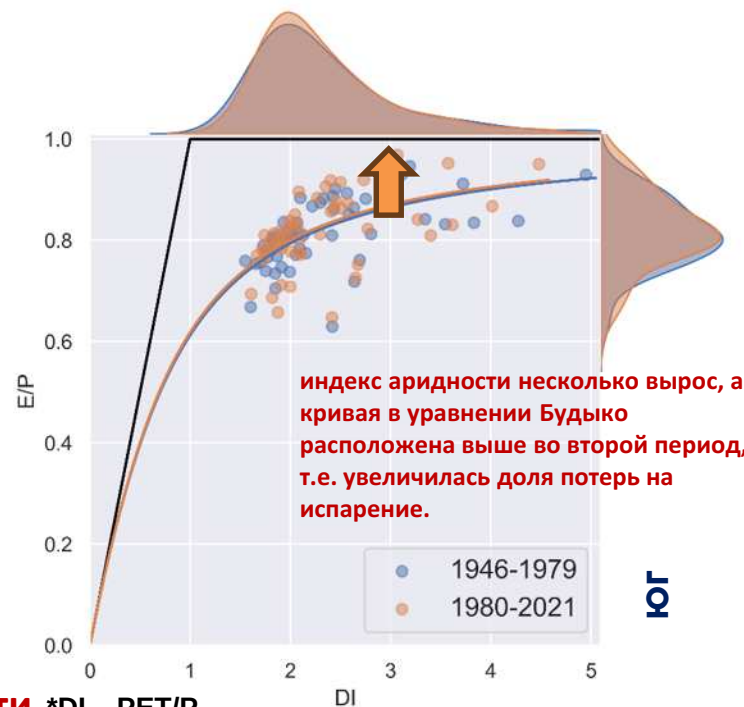
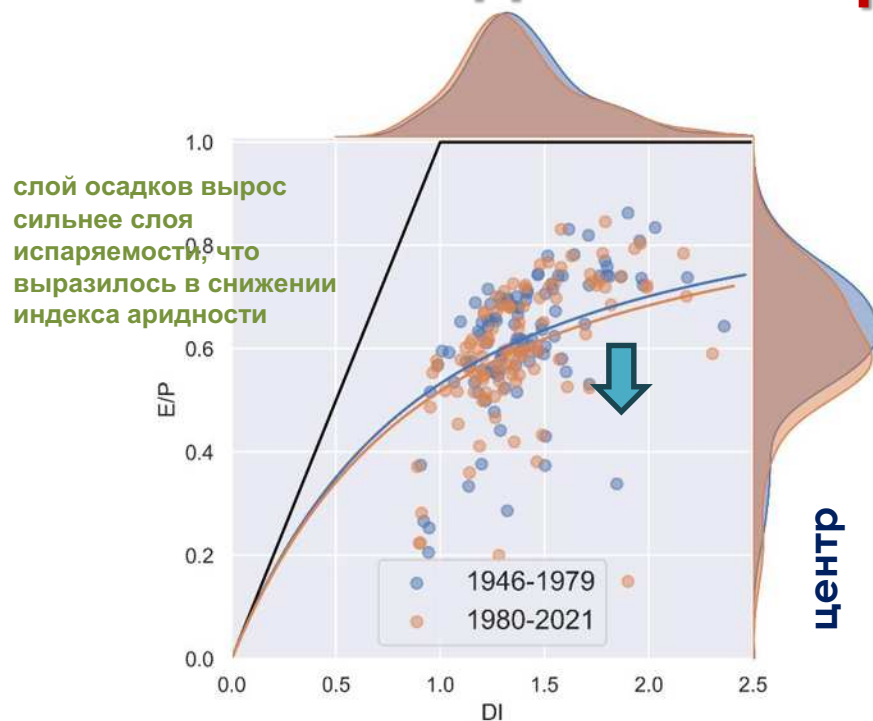
Параметр ω определялся путем подбора (калибровки) по известным величинам P , PET и R для каждого водосбора по данным за 1980–2021 гг. (ω_2) и 1946–1979 гг. (ω_1). Значения ω могут меняться во времени в результате изменения особенностей внутригодового распределения осадков и потенциального испарения, растительного покрова и типа землепользования [Григорьев и др., 2020]



(ω)-чем он больше, тем большая доля осадков расходуется на испарение при одной и той же величине индекса аридности. Умеренные, в пределах **15%**, изменения стока могут быть связаны как с изменением осадков и испаряемости, так и с изменением прочих факторов, но большие изменения - на **30% и более** связаны уже главным образом с изменением параметра ω .

Климатические изменения не объясняют наиболее значимые изменения
годового стока

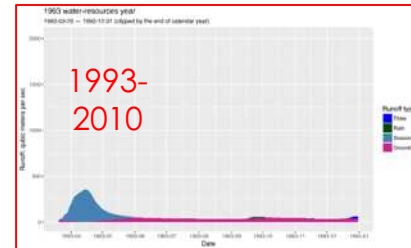
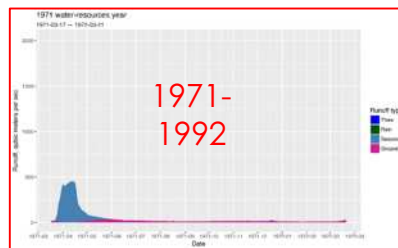
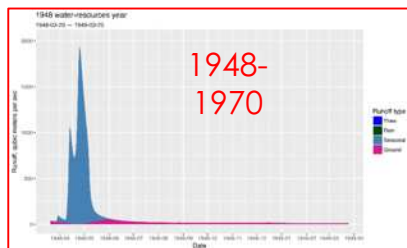
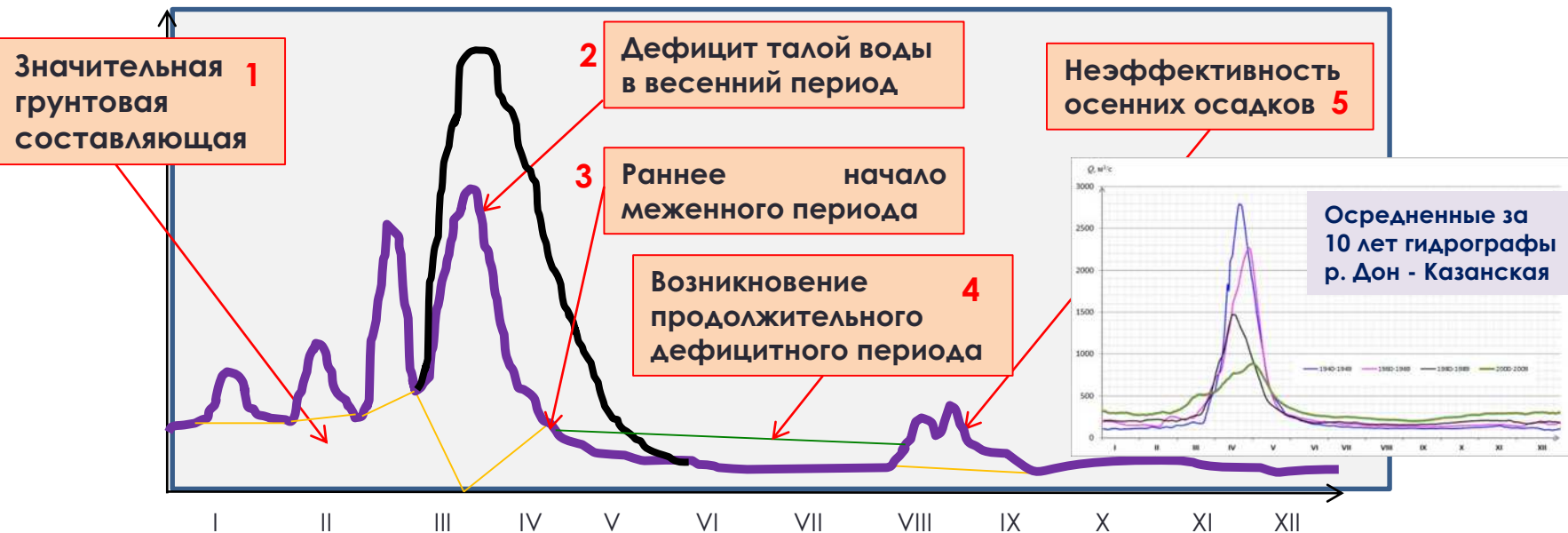
Изменение доли потерь стока на испарение



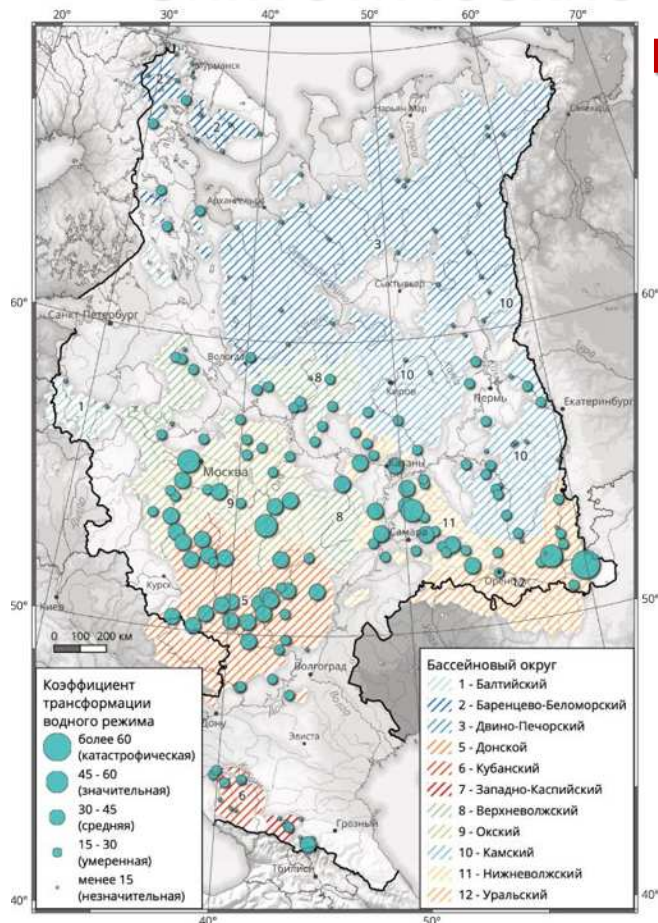
индекс аридности *DI – PET/P

В центральной части ЕЧР условия для формирования стока **улучшились**,
в южной – **ухудшились**. На севере изменений нет.

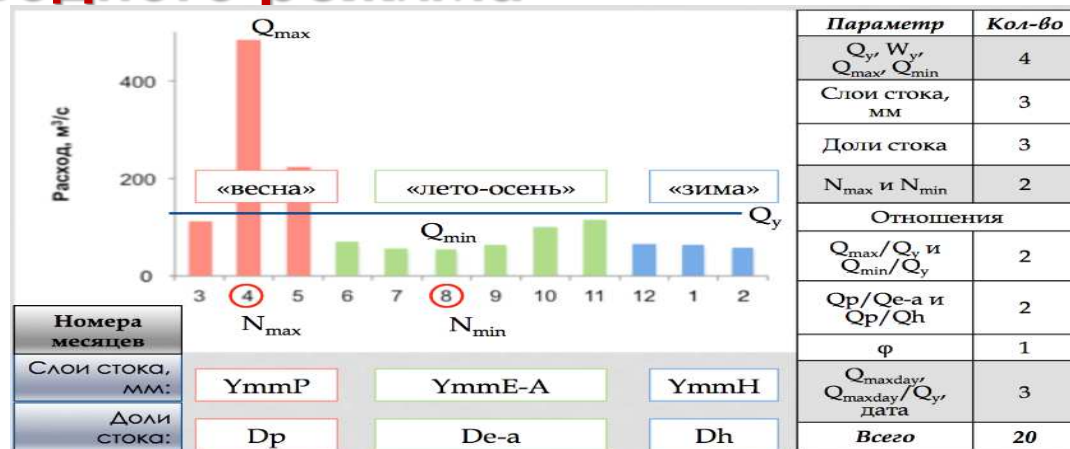
Тип водного режима рек ЕТР, особенно Центральной России изменился и тяготеет к Западно-Европейскому с влажной и тёплой зимой



Синтетические карты: оценка трансформации водного режима



водного режима



Коэффициент трансформации водного режима (КТР) — синтетическая количественная характеристика, рассчитываемая по изменениям гидрологических характеристик:

- среднегодовой расход,
- максимальный расход,
- доля стока за «весенний» период
- доля стока за «зимний» период,
- базисный сток

Значения коэффициента экспертным путём разделены на пять классов: незначительная (до 15%), умеренная (15-30%), средняя (30-45 %), значительная (45-60 %), катастрофическая (> 60%) трансформация

Карта водного режима рек ЕТР

Типы водного режима на Европейской территории России

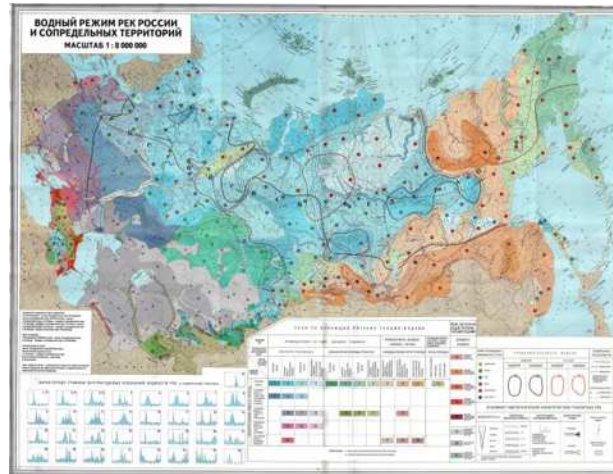
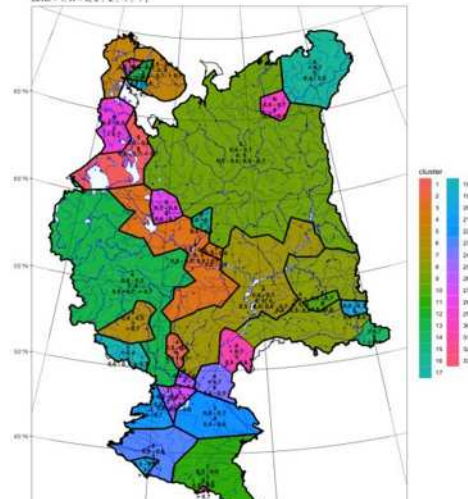


Месяц прохождения максимального месячного стока

Доля стока за весенний сезон

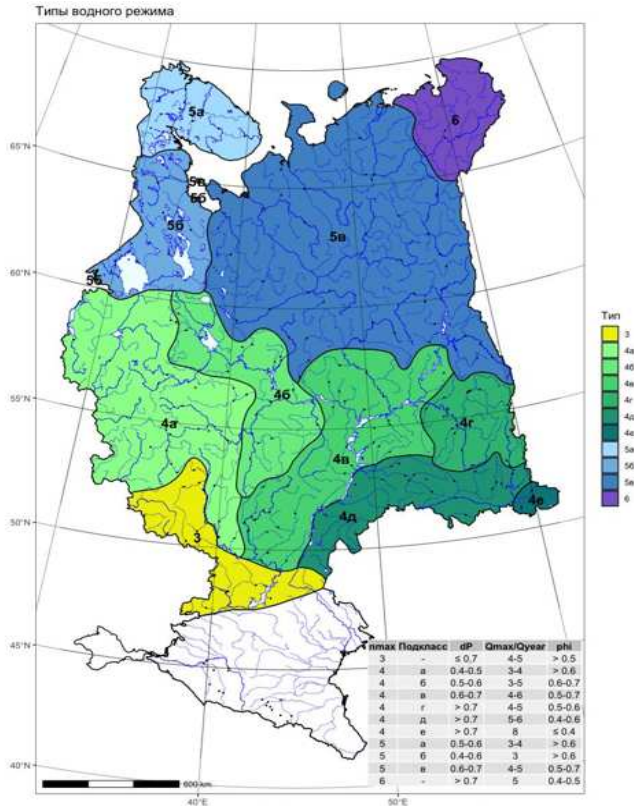
Отношение максимального расхода к среднему годовому

Ведущие факторы: птмах , dP
Level = 1, 20 = 0.25, 25 = 0.5, 30 = 0.75



Кластеризация при ведущих факторах

(месяц прохождения максимального месячного стока и доля стока за весенний сезон)



Белый цвет соответствует территориям с неклассифицированным режимом



МГУ имени М.В.Ломоносова
Географический факультет
Кафедра гидрологии суши, кафедры картографии и геоинформатики

Комплексное исследование и картографирование современного водного режима рек европейской территории России и его опасных проявлений



О Проекте

Блок «О проекте» содержит краткую информацию о проекте

Анализ и статистика

Расчет статистических характеристик различных временных рядов параметров водного режима рек, построение графиков

Карты

Аналитические, синтетические и комплексные карты среднеклиматических величин параметров водного режима, а также связанных с ними климатических параметров за два периода: «исторический» (до 1977 г.) и «современный» (с 1978 г. по настоящее время).

Проект выполнен при поддержке **Российского географического общества** и **Российского фонда фундаментальных исследований** (№ 17-04-41030-РГО)

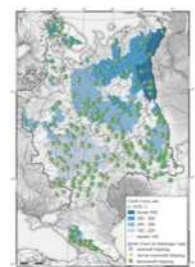
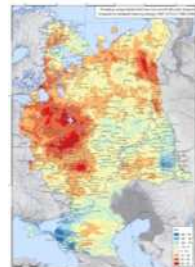


РУССКОЕ
ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ
ОБЩЕСТВО

Фролова, Самсонов и др., 2024

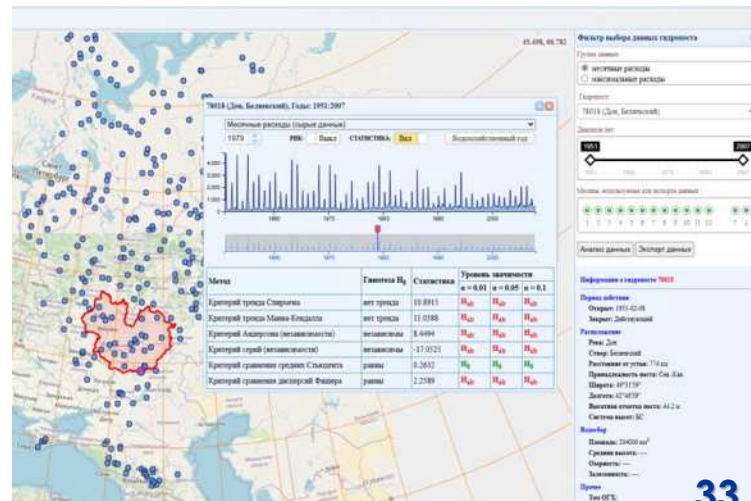
Предоставляет доступ к базам данных, а также картам, подготовленным в рамках проекта.

Веб-приложение создано на основе открытых технологий с использованием трехуровневой архитектуры: сервер баз данных (PostgreSQL), ГИС-сервер (GeoServer), и веб-сервер (Apache + OpenLayers/Leaflet). В рамках веб-приложения организована возможность выполнения запросов к данным гидропостов через картографический интерфейс.



Картографическое веб-приложение «Водный режим рек ЕТР»

<http://autolab.geogr.msu.ru/water-regime-etr/index.html>



Изменение характеристик водного баланса, годового стока и водного режима

За 1946–2021 гг., с учетом существенных региональных различий, на ЕТР произошла интенсификация гидрологического цикла, проявившаяся в росте величин осадков, речного стока, испарения и потенциального испарения.

Основной регион в пределах ЕТР, характеризующийся повышенной водностью, локализуется на наветренных склонах Волжской макродолины и Урала. В изменение величины годового стока основной вклад (>60%) внесло изменение слоя годовых осадков.

Годовой сток рек Сибири и Дальнего Востока в арктические моря России неуклонно растет с 1980-х гг. Наиболее заметен рост (10–50%) в нижней части бассейна Иртыша и на Обь-Иртышском междуречье, на восточном склоне Уральских гор, а также на территории от Хатанги до Колымы.

Результаты расчетов подтвердили ряд полученных ранее выводов об изменении и трансформации водного режима рек ЕТР и показали, что в последние 30 лет в средней и южной части Европейской территории России – в бассейнах Волги, Оки, Вятки, Дона – наблюдается снижение объемов половодья, рост меженных расходов воды и увеличение доли паводочного стока в годовом.

Снижение стока половодья происходит на фоне увеличения минимального зимнего стока в основном за счет зимних паводков, объем которых на большинстве рек увеличился на 20–30 %. Также за счет оттепелей повышается питание подземных вод.

Спасибо за внимание!