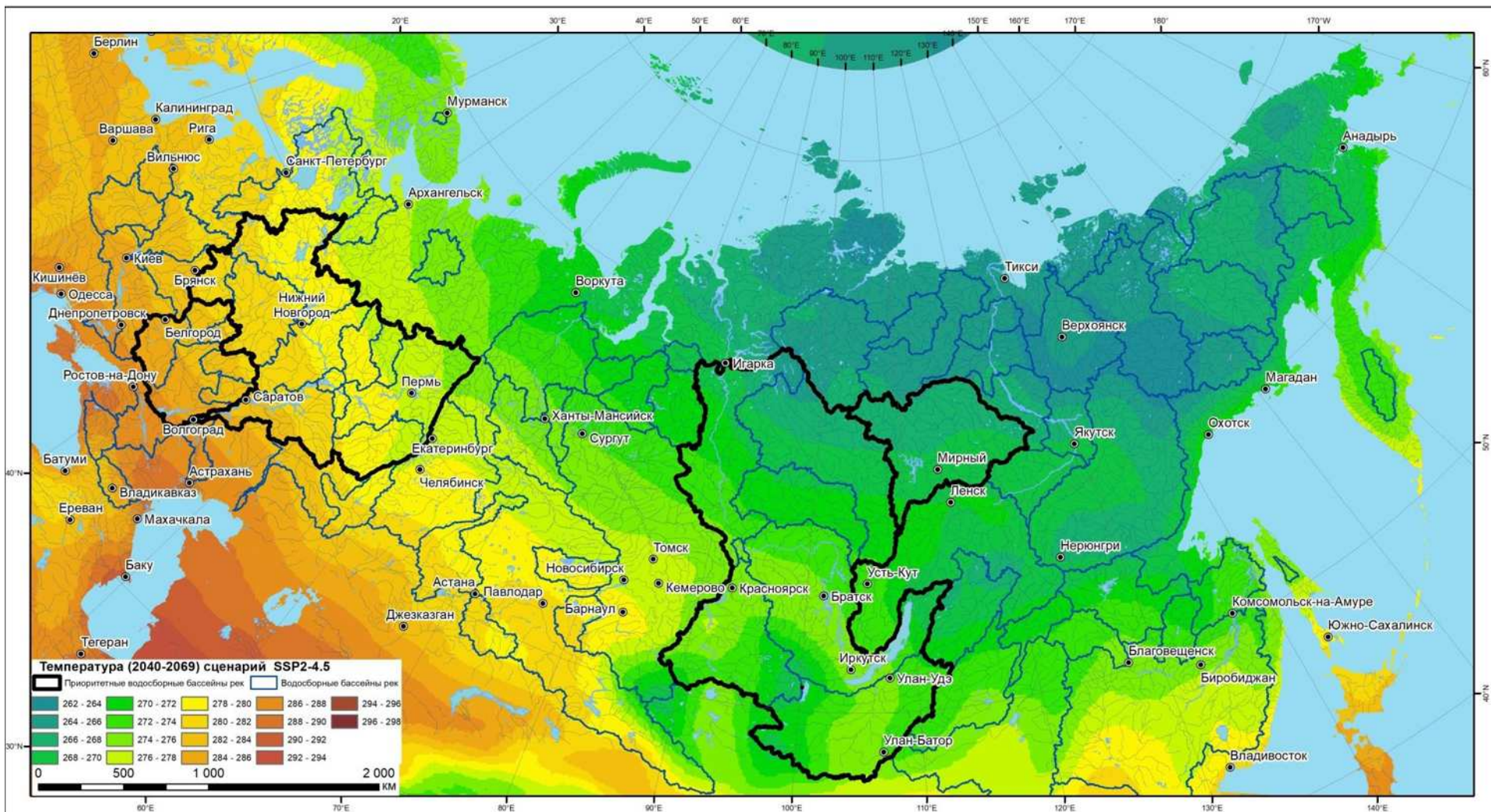


Речной сток крупнейших рек России в условиях современного и сценарного глобального потепления

Институт географии РАН, georgiadi@igras.ru



Представлены результаты сравнительного анализа изменений стока крупных рек в разных регионах России в условиях современного глобального потепления и в период сценарных антропогенных изменений климата в XXI веке.

Исследование основано

- на результатах анализа многолетних рядов наблюдений за стоком рек,
- методах восстановления многолетних характеристик речного стока,
- модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН,
- на оценках сценарных изменений годового стока рек, рассчитанных методом годового водного баланса с использованием данных климатических сценариев изменений атмосферных осадков и испарения, полученных в рамках программы CMIP5 на ансамбле глобальных климатических моделей.

Одна из важных задач этого исследования состояла в том, чтобы выявить

-соотношение изменений стока в период современного и сценарного глобального потепления,

-а также соотношение изменений в период современного глобального потепления, полученных на основе анализа данных наблюдений и модельных оценок.

Данные о речном стоке

Исследование основывалось **на многолетних рядах расходов воды крупных рек с близким к естественному водным режимом** (Северная Двина–Усть-Пинега, Печора–Усть-Цильма) и **рядах с восстановленным стоком (с исключенными из него антропогенными изменениями, то есть приведенным к естественным условиям)**: Волга–Волгоград, Дон–Раздорская, Обь–Салехард, Иртыш–Тобольск, Енисей–Игарка, Ангара–Пашки и Богучаны, Лена–Кюсюр, Виллой–Хатырык-Хомо. Для восстановления многолетних рядов антропогенно-измененного стока использовался **метод трансформации годового гидрографа средних суточных расходов воды, основанный на методике Калинина–Милюкова** (Калинин, Милюков, 1958). На основе этого метода были получены многолетние ряды восстановленных (условно-естественных) средних суточных расходов воды Дона, Оби, Иртыша, Енисея, Ангары, Лены, Виллюя (Георгиади, Милюкова, 2023а; Arctic..., 2021; Georgiadi et al., 2023; Milyukova et al., 2020). **Многолетний ряд годового и сезонного стока Волги у г. Волгограда был восстановлен на основе метода рек индикаторов климатических изменений** (Георгиади и др., 2014). **Многолетний ряд восстановленного годового и сезонного стока Ангары у с. Пашки был рассчитан на основе многолетнего восстановленного ряда среднемесячных уровней воды Байкала**, полученного на основе метода водного баланса озера (Sinyukovich et al., 2024) и последующей кубической интерполяции месячных в средние суточные расходы воды.

Методы

Для восстановления гидрографа стока близкого к условиям естественного водного режима применяется метод Г.П. Калинина-П.И. Милюкова (1958), в основе которого используется линейная модель, описывающая связь между расходами воды на входе и выходе расчетного участка реки. Согласно этому методу расход в замыкающем створе рассчитывается по интегралу

$$Q(t) = \int_0^t q(t)P(t - \tau)d\tau$$

где $Q(t)$ - расход в замыкающем створе в момент времени t , $q(t)$ - расход на входе расчетного участка, $P(t)$ –функция влияния (кривая добегания)

$$P(t) = \frac{1}{\tau(n-1)!} \left(\frac{t}{\tau} \right)^{n-1} e^{-\left(\frac{t}{\tau} \right)}$$

где n - количество характерных участков с одинаковым временем добегания, равным τ .

Река, створ	Площадь бассейна, тыс. км²	Многолетний ряд стока, годы	Базовый период, годы	Период современног о глобального потепления, годы	Средний многолетний годовой сток, км³
Волга–Волгоград	1360 (1369) ^{б)}	1879–2020	1931–1980	1981–2020	260
Кама–Пермь (Камская ГЭС)	169	1881–2010	1931–1980	1981–2010	53.2
Дон–Раздорская	378 (422) ^{б)}	1891–2019	1931–1980	1981–2019	24.3 (25.5) ^{г)}
Сев. Двина–Усть-Пинега	348 (357) ^{б)}	1882–2020	1931–1980	1981–2020	104.9
Печора–Усть-Цильма	248 (322) ^{б)}	1932–2020	1932–1980	1981–2020	110.4 (129) ^{г)}
Обь–Салехард	2450 (2890) ^{в)}	1936–2016	1936–1980	1981–2018	404
Иртыш–Тобольск	969	1891–2016	1931–1980	1981–2016	69
Енисей–Игарка	2470 (2620) ^{б)}	1936–2016	1936–1980	1981–2016	592
Ангара–Богучаны	866	1945–2016	1945–1980	1981–2016	110
Ангара–Пашки (Иркутская ГЭС)	571	1899–2020	1931–1980	1981–2020	62.1
Лена–Кюсюр	2430 (2490) ^{б)}	1936–2019	1936–1980	1981–2019	542
Вилюй–Хатырык-Хомо	452 (454) ^{б)}	1937–2010	1937–1980	1981–2010	48.3

Таблица
Средний многолетний сток^{а)} и исследуемые периоды

а) пояснения; б) площадь бассейна до устья;
в) площадь бассейна с учетом бессточных территорий;
г) средний многолетний годовой сток в устье по данным
https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchei_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022

Изменения годового стока рек были рассчитаны также на основе осредненных данных, полученных на ансамбле глобальных климатических моделей программы CMIP5 о годовых атмосферных осадках и годовом испарении и уравнении водного баланса. Расчеты проведены для бассейнов рек до их устья и включали, кроме перечисленных в табл. рек, следующие реки: Неву (площадь бассейна 281 тыс. км², годовой наблюдаемый сток 74.3 км³), Днепр (504 тыс. км², 53.5 км³), Амур (1850 тыс. км², 338 км³) и Колыму (635 тыс. км², 123 км³).

Данные об атмосферных осадках, испарении и температуре воздуха и их сценарных изменениях

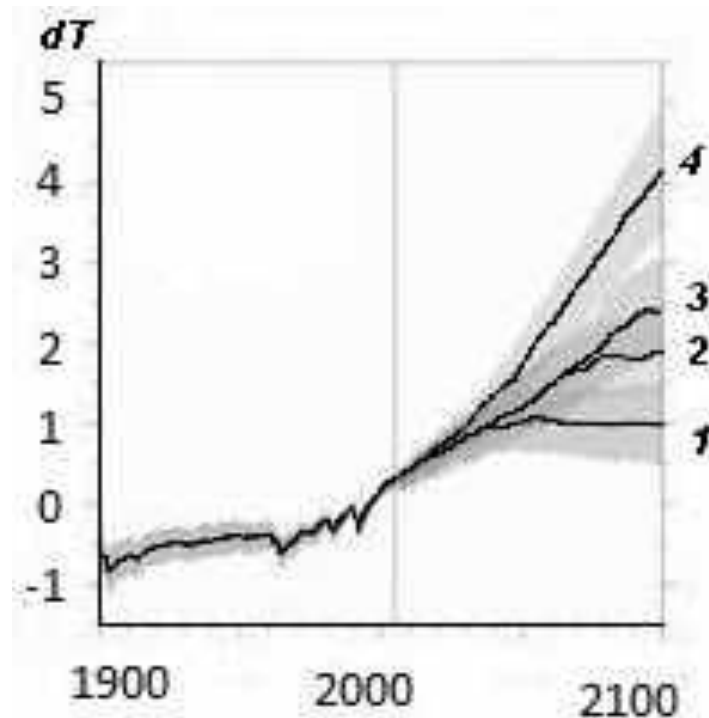
Основу для оценок изменений речного стока составили данные о климатических элементах для периодов 1931-1980 гг. и 1981-2010 гг. и сценарных периодов, подготовленных в рамках программы CMIP5 (Meehl, Bony, 2011; KNMI). Были использованы те из четырех семейств сценариев, которые характеризуются наиболее (RCP8.5) и наименее (RCP 2.6) интенсивным ростом средней глобальной годовой температуры воздуха для периодов 2010–2039 и 2040–2069 гг. **Такой подход на основе учета наиболее широкого диапазона возможных климатических изменений обусловлен отсутствием критериев выбора какого-либо из имеющихся семейств (групп) климатических сценариев.** Аномалии среднемесячных средних многолетних значений температуры воздуха и сумм атмосферных осадков для указанных выше сценарных периодов получены по результатам расчетов, проведенных на ансамбле глобальных климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана (КМОЦАО). **Ансамблевые сценарные климатические характеристики осреднялись по результатам расчетов, проведенных на 30 климатических моделях, включенных в эту программу.**

В качестве базового, для оценки сценарных и современных изменений годового речного стока, был использован период 1931–1980 гг., а в качестве периода современного глобального потепления 1981–2010 гг.

Для оценки сценарных изменений годового и сезонного стока Вилуя у с. Хатырык-Хомо в качестве входных данных для проведения расчетов на модели месячного водного баланса (ММВБ ИГРАН) были использованы данные сценарных изменений среднемесячных атмосферных осадков и температуры воздуха программы CMIP5, полученные на пяти глобальных климатических моделях (GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M) проекта ISI-MIP2-The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, которые были осреднены для периода 2036–2065 гг. Данные о климатических характеристиках для базового периода относятся к 1971–2001 гг. Они были получены на основе реанализа, проведенного в рамках программы EU WATCH (Harding et al., 2011).

KNMI Climate Explorer https://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip5.cgi?id=someone@somewhere
<https://www.isimip.org>

Изменение среднеглобальной температуры воздуха в соответствии с климатическими сценариями, полученными в рамках программ CMIP5



- 1 - RCP 2.6
- 2 - RCP 4.5
- 3 - RCP 6.0
- 4 - RCP 8.5

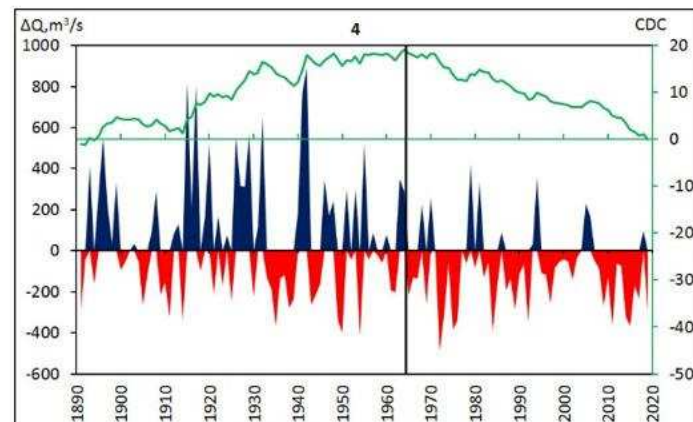
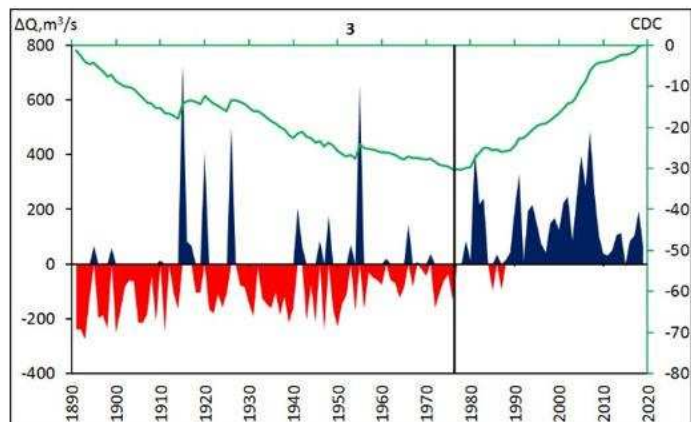
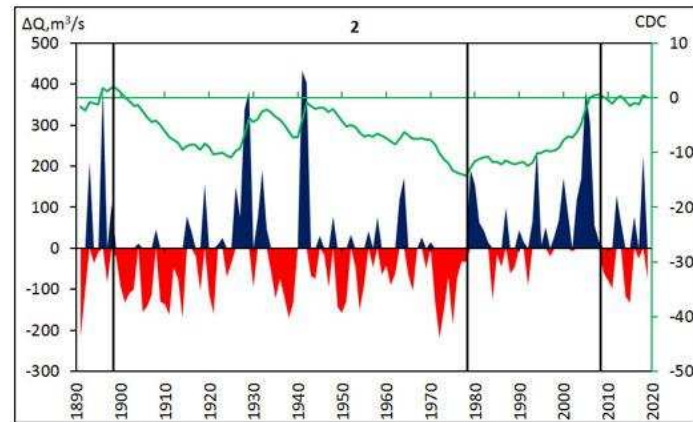
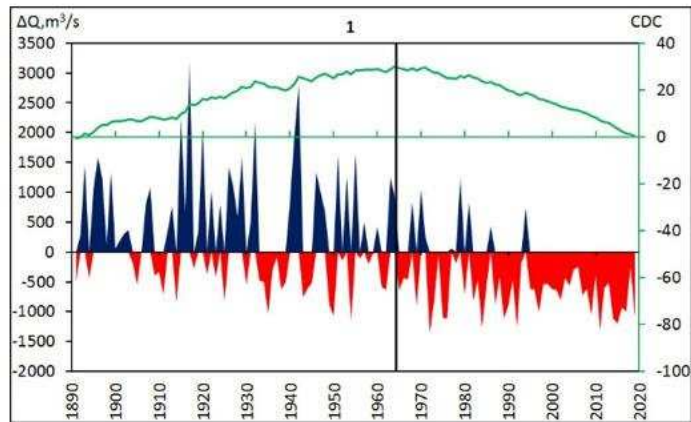
Методы

Метод оценки изменений стока в период современного потепления на основе многолетних данных наблюдений

Оценки изменений стока основываются на сравнении средних характеристик стока периода современного глобального потепления и предшествующего ему базового периода, отличающихся между собой климатическими условиями. **За начало периода современного глобального потепления использовали 1981 г. А базовым служил период 1931–1980 гг., принятый для исчисления многолетних норм гидрологических характеристик.**

В качестве временной границы между ними, как правило, принимаются годы из периода 1970–1980 гг.. Это связано с тем, что примерно в эти годы происходило достаточно заметное повышение температуры воздуха, а также на многих реках наблюдалась смена долговременных фаз пониженного/повышенного стока. Отметим, однако, что как было показано (на основе анализа долговременных фаз в многолетних изменениях годовой и зимней температуры воздуха) переход к фазе повышенной годовой и зимней температуры воздуха, осредненной по территории бассейнов крупных рек (Волги, Дона, Печоры, Енисея, Лены, Колымы) происходил зачастую достаточно постепенно в 1970–1980-е годы. При этом в ряде речных бассейнов, например, в бассейнах Северной Двины, Дона и других, такой переход, особенно для зимней температуры воздуха отчетливо проявлялся во второй половине 1980-х годов. Что касается атмосферных осадков, то, как правило, переход к долговременному периоду повышенных атмосферных осадков относится к 1960–1970-м и даже к 1950-м годам. Но, в связи с тем, что многолетние ряды атмосферных осадков характеризуются значительной неоднородностью, связанной, в том числе и с поправками на смачивание, введенными в 1960-е годы (Георгиади, Кашутина, 2016), то годы смены контрастных фаз для атмосферных осадков могут определяться недостаточно корректно. Кроме того, годы смены долговременных фаз повышенного/пониженного годового и сезонного стока на одной реке и на реках разных регионов существенно отличаются между собой, а также зачастую не совпадают с началом используемого периода современного глобального потепления/повышения температуры воздуха).

Долговременные фазы годового и сезонного стока.



Многолетние изменения восстановленного стока за (1) половодье, (2) летне-осенний период, (3) зимний период и (4) год: (а), выраженные в отклонениях от среднего многолетнего стока за весь период наблюдений- ΔQ , $\text{м}^3/\text{с}$ (синий и красный цвет) и в виде разностно-интегральных кривых-CDC (зеленый цвет).

Вертикальные черные линии показывают годы смены контрастных фаз стока.

(Georgiadi, Milyukova et al., GES, 2023)

Модель месячного водного баланса Института географии РАН

Модель месячного водного баланса Института географии РАН (ММВБ ИГРАН), результаты расчетов на которой и послужили одной из основ для настоящего исследования, была разработана для оценки изменений стока крупных речных бассейнов, вызванных климатическими изменениями в условиях теплых эпох геологического прошлого и в условиях сценарных изменений климата в XXI в. (Георгиади, Милюкова, 2002; Георгиади и др., 2011, 2014). В ее основе лежит уравнение среднего многолетнего месячного водного баланса речных водосборов для расчетных ячеек регулярной сетки. Модель прошла апробацию для крупных речных бассейнов, характеризующихся существенно отличающимися условиями формирования стока.

Метод среднего многолетнего годового водного баланса

Оценка среднего многолетнего годового речного стока крупных рек России для условий современного и сценарного (антропогенно-обусловленного) глобального потепления основана на использовании уравнения среднего многолетнего водного баланса и данных о современных и сценарных средних многолетних годовых суммах атмосферных осадков и годового испарения, полученных осреднением результатов расчетов, проведенных в рамках программы CMIP5. На основе сравнения расчетных значений годового стока базового периода, периодов современного и сценарного глобального потепления оценивались его относительные изменения.



Monthly Water Budget Model

The model is based on a conservation equation of average long-term monthly water balance of river catchments. In general it can be written down for each cell of a regular grid in the following way:

$$Q_s(t) + Q_{gr}(t) = P(t) - E(t) - I_d(t) - dW / dt$$

$Q_s(t)$ - the total surface and subsurface (seasonal active layer) flow (mm)

$Q_{gr}(t)$ - groundwater flow (mm)

$Q_s(t) + Q_{gr}(t)$ - full river runoff

$P(t)$ - atmospheric precipitation (mm)

$E(t)$ - evaporation (mm)

$I_d(t)$ - infiltration of water to deep horizons of underground water outside of active water exchange zone (mm)

dW/dt - change of water amount in **active water exchange zone of the river basin** for the time interval dt

The model simulates the following processes:

infiltration
and moisture
accumulation
in the soil

evaporation
(based on a
modified
Thornthwaite's
method)

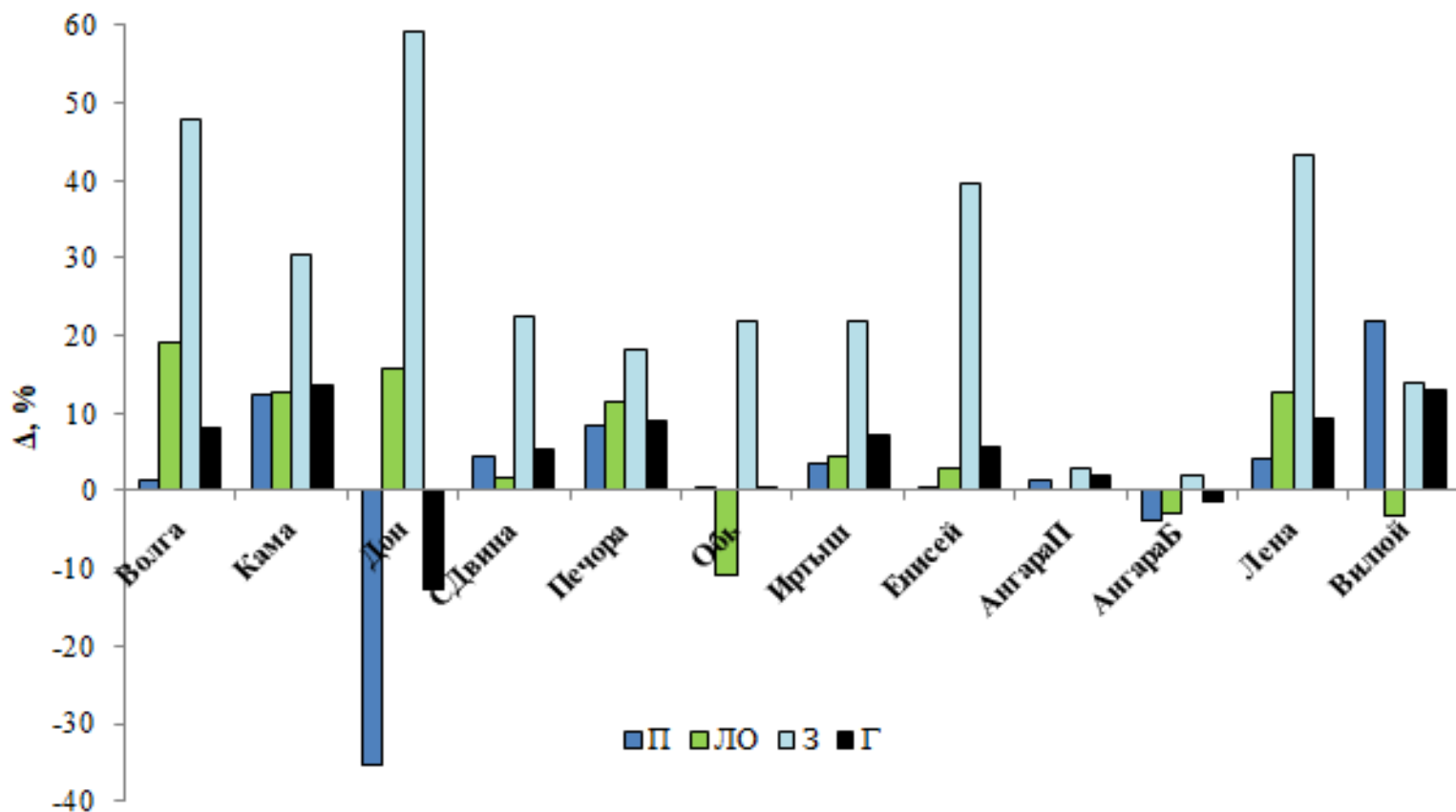
movement of the
freezing front
calculated from a
simplified solution
for classical
single-front
Stefan problem

formation of
surface,
subsurface and
groundwater
flow in the
rivers and full
river runoff

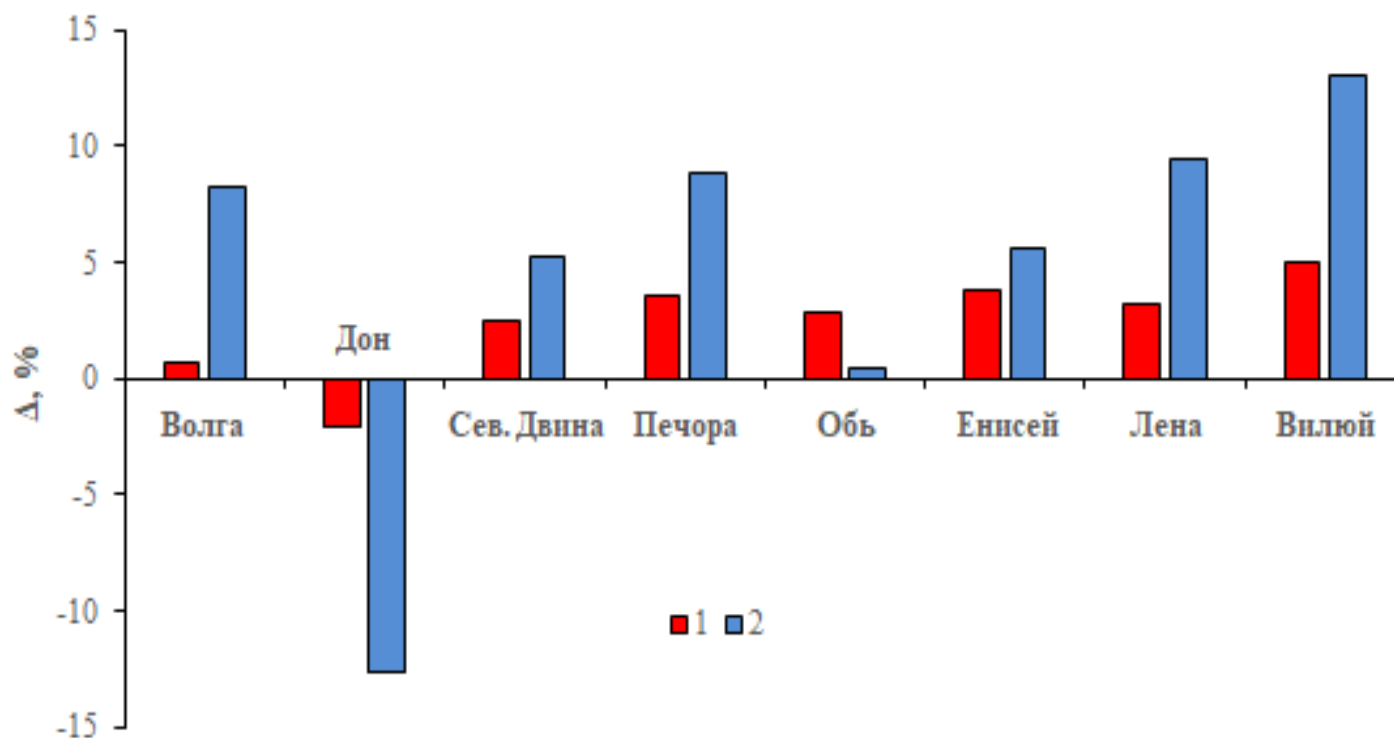
water
accumulation in
the snow cover
and snow melting
(based on
V.D. Komarov's
method)



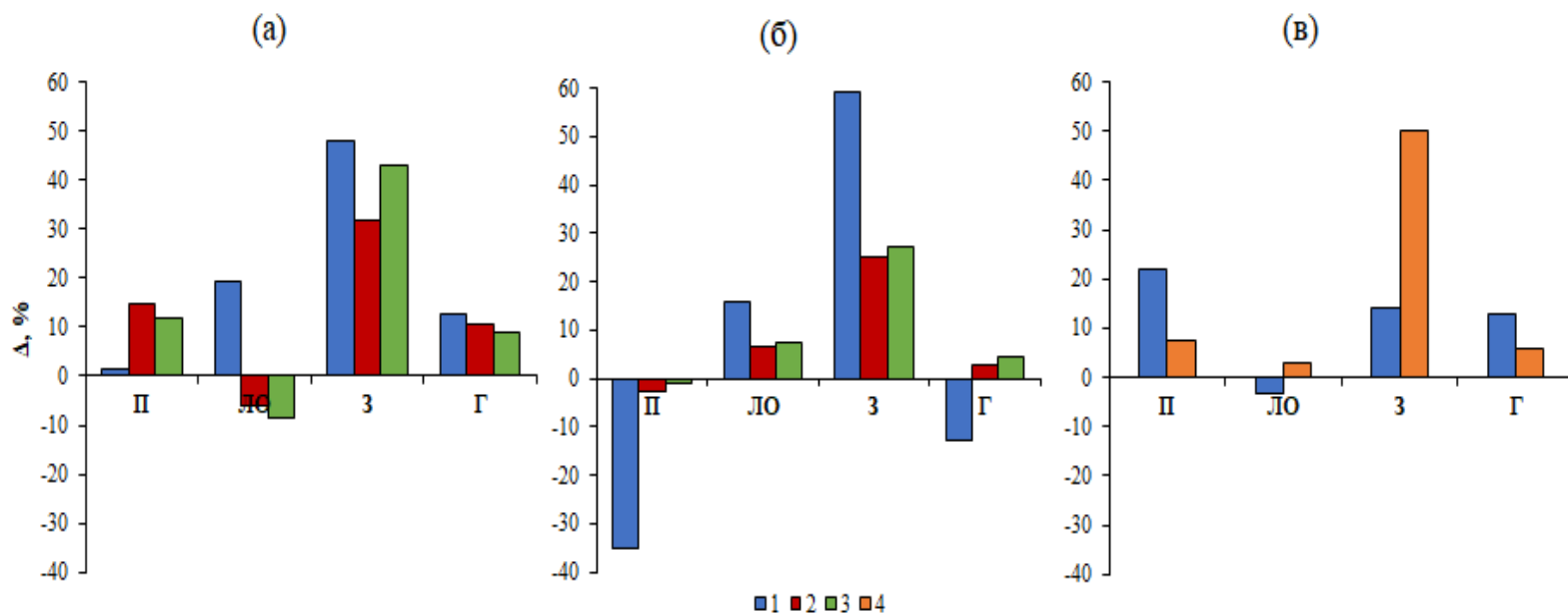
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ



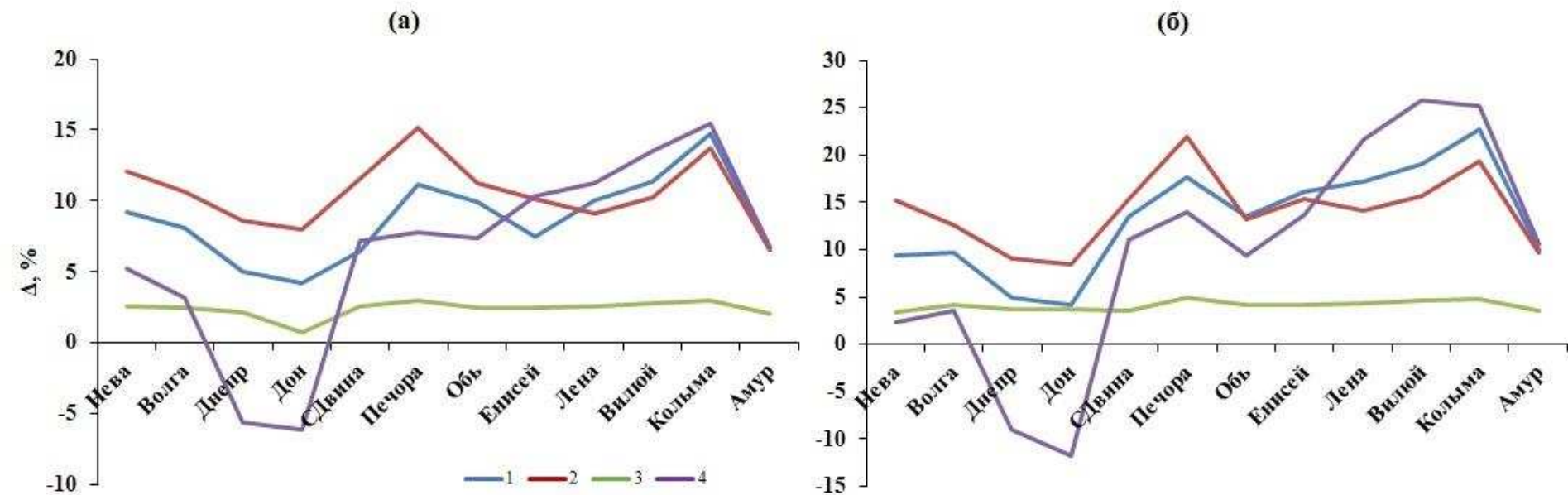
Относительные изменения (Δ , %) стока половодья (П), летне-осеннего (ЛО), зимнего (З) и годового стока (Г) в период современного глобального потепления (начиная с 1981 г.) в сравнении со стоком базового периода (1930-е–1980 гг.), рассчитанные по многолетним данным о стоке, из которых исключены антропогенные изменения.



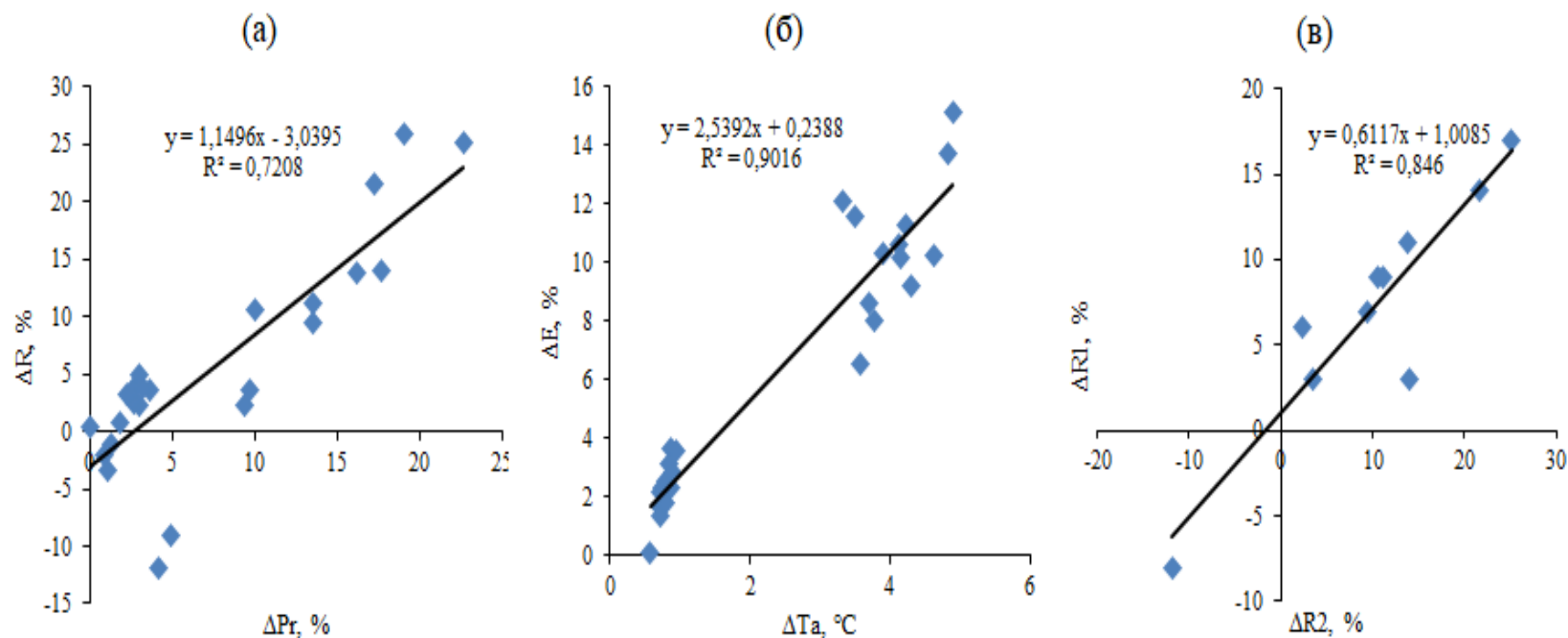
Относительные изменения годового стока (Δ , %) в период современного глобального потепления в сравнении со стоком базового периода, рассчитанные по уравнению водного баланса и данным об атмосферных осадках и испарению, осредненным по ансамблю глобальных климатических моделей программы CMIP5 (1), и по многолетним данным о стоке с исключенными антропогенными изменениями (2).



Относительные изменения (Δ , %) годового стока (Г), стока половодья (П), летне-осеннего (ЛО) и зимнего (З) стока Волги (а), Дона (б) и Вилюя (в): в период современного глобального потепления в сравнении со стоком базового периода, рассчитанные по многолетним данным о стоке с исключенными антропогенными изменениями (1), в период сценарного потепления в 2010–2039 гг. по модели месячного водного баланса и сценарным данным об атмосферных осадках и температуре воздуха, осредненным по данным ансамбля глобальных климатических моделей программы CMIP5 для сценариев RCP2.6 и RCP8.5 соответственно в сравнении со стоком базового периода 1931–1980 гг. (2, 3), в период сценарного потепления 2035–2065 гг. в сравнении со стоком базового периода 1971–2000 гг. (4).



Сценарные изменения (Δ , %) годовых сумм атмосферных осадков (1), годового испарения (2), годовой температуры воздуха, Δ , °C (3), годового стока в период сценарного потепления 2040–2069 гг. в сравнении со стоком базового периода (4) для сценариев RCP2.6 (а) и RCP8.5 (б).



Регрессионные зависимости между относительными (%) сценарными изменениями, полученными по данным ансамбля глобальных климатических моделей по климатическому сценарию RCP8.5 программы CMIP5.

(а) – годового стока и годовых атмосферных осадков для периода 2040-2069 гг.; (б) – годового испарения и годовой температуры воздуха для периода 2040-2069 гг.; (в) – годового стока, рассчитанного авторами по уравнению годового водного баланса для периода 2040–2069 гг. ($\Delta R2$) и полученными в (Георгиевский, Голованов, 2019) для периода 2041–2060 гг., по расчетам на ансамбле глобальных климатических моделей ($\Delta R1$).

Заключение

Выполнен сравнительный анализ изменений естественного и восстановленного стока (с исключенными из него заметными антропогенными изменениями) крупных рек Русской равнины (Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Невы), Сибири (Оби, Иртыша, Енисея, Ангары, Лены, Вилюя) и Дальнего Востока (Амура) в условиях современного глобального потепления и в период сценарных антропогенных изменений климата в XXI веке, в результате которого были получены следующие основные результаты.

1. В период современного глобального потепления (начиная с 1981 г.) по сравнению с предшествующим базовым периодом (1931–1980 гг.) на Волге, Каме, Северной Двине, Печоре, Оби, Иртыше, Енисее, Ангаре, Лене и Вилюе наблюдалось повышение годового стока и стока основных гидрологических сезонов, особенно ощутимое в зимний, а также в летне-осенний гидрологические сезоны. Тогда как, на Дону наряду с самым значительным из всех рассмотренных рек относительным увеличением зимнего, а также заметным ростом летне-осеннего стока, выявлено наибольшее снижение стока половодья, а также и годового стока. Снижение летне-осеннего стока выявлено на Оби (наиболее заметное) и Вилюе, а на Ангаре у с. Богучаны незначительное снижение стока половодья, летне-осеннего и годового стока. **Размах (масштаб аномалий) относительных изменений стока в период современного глобального потепления во многом обусловлен особенностями долговременных фаз повышенного/пониженного годового стока и стока основных сезонов (их продолжительностью, временем смены и масштабом различий среднего стока контрастных фаз).**

2. Выявлено совпадение знака изменений годового стока Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены и Вилюя в период современного глобального потепления, рассчитанных по данным наблюдений и по уравнению водного баланса с использованием данных изменений атмосферных осадков и испарения, полученных осреднением результатов расчетов на ансамбле глобальных климатических моделей программы SMIP5. При этом изменения стока в период современного глобального потепления, рассчитанные по данным наблюдений, оказались на всех рассмотренных реках (кроме Оби) существенно больше модельных.

3. На Волге, Дону и Вилуе знак изменений годового и сезонного стока в период современного глобального потепления (определенных на основе данных наблюдений и их сценарных изменений, рассчитанных на модели месячного водного баланса Института географии РАН с использованием модельных среднеансамблевых сценариев изменений атмосферных осадков и температуры воздуха программы CMIP5) совпал на трех реках только относительно стока зимнего сезона, когда в том и другом случае были выявлены **повышенные его значения**. На Волге и Вилуе годовой сток также возрастает как в условиях современного, так и сценарного потепления. В других случаях для каждой из рек характерны соотношения между современными и сценарными изменениями, свойственные каждой из рек.

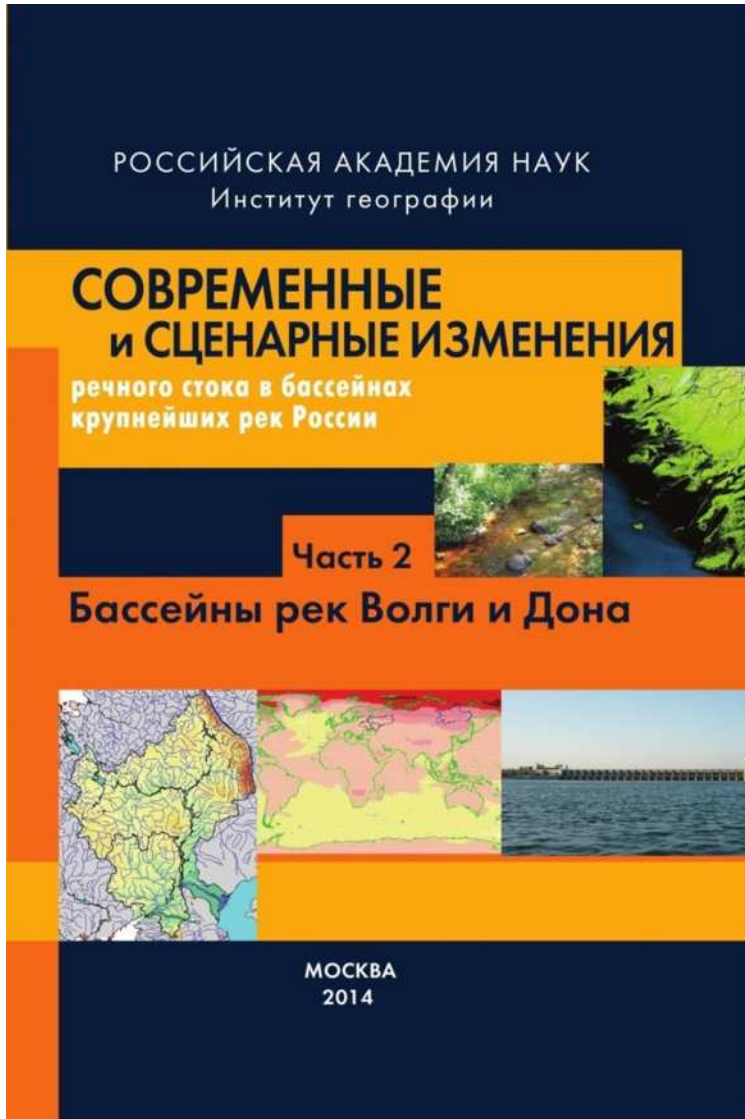
4. Годовой сток Волги, Невы, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены, Вилуя, Колымы и Амура, рассчитанный по уравнению водного баланса с использованием данных об атмосферных осадках и испарении, полученных осреднением результатов расчетов на ансамбле глобальных климатических моделей программы CMIP5 для 2040–2069 гг. для сценариев с наименее (RCP2.6) и наиболее (RCP8.5) интенсивным потеплением, может быть выше базового соответственно на 3–15 и 3–26%. Только сток Дона и Днепра, вероятно, снизится соответственно на 6–5.5% (сценарий RCP2.6) и 11.8–9% (сценарий RCP8.5).

5. Относительные сценарные изменения годового стока крупных рек в сравнении со стоком базового периода довольно тесно коррелируются с соответствующими изменениями годовых сумм атмосферных осадков, а сценарные изменения суммарного испарения с изменениями годовой температуры воздуха.

6. Оценки относительных изменений среднего многолетнего годового стока Невы, Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены, Колымы, Амура для сценария RCP8.5 для периода 2040–2069 гг. хорошо согласуются с результатами, полученными ранее (Георгиевский, Голованов, 2019) на основе расчета стока рассмотренных рек в гидрологических блоках глобальных климатических моделей для сценария RCP8.5 для периода 2041–2060 гг.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 24-27-00143 “Сток рек России в эпохи глобального потепления”

Publications



*A.G. Georgiadi, N.I. Koronkevich,
I.P.Milyukova, E.A.Kashutina, E.A.
Barabanova.*

**Contemporary and Scenario River Runoff
Changes in the Largest River Basins of
Russia. Part 2. The Volga and Don river
basins:** - Moscow: MAKSS Press, 2014. - 216
p.

The results of studies for contemporary and scenario river runoff changes in the Volga and Don basins, probable in the first third of the XXI century, under the influence of the global climate change and socio-economic transformation are presented. Originality of these investigations lies in the fact that there were revealed long-term phases of changes for the naturalized annual and seasonal Volga and Don river runoff since the end of the XIX to the beginning of the XXI century, and their affection by the complex of anthropogenic factors are revealed, and the integrated assessment of changes for the river runoff, based on ensemble of climatic scenarios and alternative scenarios of water consumption is given as well.

Key words: river basins, river runoff, hydrological changes, long-term phase changes, climatic and anthropogenic factors, climate and hydrological scenarios changes, hydrological models

THANKS FOR YOUR ATTENTION



Is Anything *Really* Moving ... or is it just an Illusion?

