

УДК 556.5.01

РЕЧНОЙ СТОК КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО И СЦЕНАРНОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2024 г. А. Г. Георгиади^{1,*}, И. П. Милюкова¹, О. О. Бородин^{1,2}, Е. А. Барабанова¹

¹Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*e-mail: georgiadi@igras.ru

Поступила в редакцию 04.09.2024 г.

После доработки 13.09.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Приведены результаты сравнительного анализа изменений стока крупных рек Русской равнины (Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Невы), Сибири (Оби, Иртыша, Енисея, Ангара, Лены, Вилюя) и Дальнего Востока (Амура) в условиях современного глобального потепления и в период сценарных антропогенных изменений климата в XXI в. Он основан на сопоставлении годового и сезонного стока базового периода и периода современного глобального потепления; расчетах на модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН; оценках изменений годового стока рек, полученных методом среднего многолетнего годового водного баланса и данных об атмосферных осадках и испарении, рассчитанных в рамках программы CMIP5 на ансамбле глобальных климатических моделей для периодов современного и сценарного глобального потепления. В период современного потепления по сравнению с предшествующим базовым периодом 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 и заметным ростом летне-осеннего стока, выявлено наибольшее снижение стока половодья, а также годового стока. Установлено 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 об атмосферных осадках и испарении, полученных осреднением результатов расчетов на ансамбле глобальных климатических моделей программы CMIP5. Относительные сценарные изменения годового стока крупных рек в сравнении со стоком базового периода довольно тесно коррелируют с соответствующими изменениями годовых сумм атмосферных осадков, а сценарные изменения суммарного испарения — с изменениями годовой температуры воздуха.

Ключевые слова: современное и сценарное глобальное потепление, крупные реки, климатические изменения годового и сезонного речного стока, модель месячного водного баланса, уравнение годового водного баланса, глобальные климатические модели общей циркуляции атмосферы и океана

DOI: 10.31857/S2587556624060011, EDN: ALPOEU

ВВЕДЕНИЕ

В связи с современным глобальным потеплением значительное внимание уделяется вопросам исследования многолетних изменений стока воды, который весьма чувствителен к происходящим климатическим изменениям. С 1970–1980-х годов все более значительное внимание уделялось оценке сценарных изменений климата и их последствий, в том числе гидрологических (Будыко, 1980). При разработке методов оценки сценарных изменений основной акцент делался на прогнозе влияния антропогенных факторов, приводивших к росту содержания парниковых

газов в атмосфере в результате хозяйственной деятельности. Представление об антропогенном характере глобального потепления, начиная с 1990-х годов, стало господствующим.

В последние десятилетия в рамках этой парадигмы проведено много исследований посвященных изменениям стока рек России в условиях сценарного антропогенного потепления в XXI в. (Водные ..., 2008; Георгиади, Милюкова, 2002, 2023б; Георгиади и др., 2011, 2014; Георгиевский, Голованов, 2019; Георгиевский и др., 1996; Гусев, Насонова, 2010; Кацов, Говоркова, 2013; Кислов и др., 2008; Мотовилов, Гельфан, 2019; Мохов и др., 2003; Arctic ..., 2021; Gelfan

et al., 2022; Georgiadi, 1991; Georgiadi et al., 2010, 2021; Kalugin, 2023).

Значительное число публикаций посвящено оценке изменений гидрологических характеристик в период инструментальных наблюдений, связанных с современным глобальным потеплением (Болгов и др., 2018; Водные ..., 2008; Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади, Милукова, 2023а, 2023б; Георгиади и др., 2014, 2019; Коронкевич и др., 2023; Научно-прикладной ..., 2021; Шпакова, Wang, 2023; Frolova et al., 2022; Georgiadi and Groisman, 2022, 2023; Georgiadi et al., 2018, 2021, 2023; Milyukova et al., 2020; Sinyukovich et al., 2024).

Отметим, что указанные выше два основных направления исследований изменений речного стока весьма слабо связаны между собой.

Статья посвящена сравнительному анализу изменений стока крупных рек в разных регионах России в условиях современного глобального потепления и в период сценарных антропогенных изменений климата в XXI в. Исследование основано на результатах анализа многолетних рядов наблюдений за стоком рек, в том числе

многолетних рядах восстановленных характеристик речного стока, расчетах на модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН, а также на оценках сценарных изменений годового стока рек, определенных методом годового водного баланса с использованием данных климатических сценариев изменений атмосферных осадков и испарения, полученных в рамках программы СМIP5 на ансамбле глобальных климатических моделей.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Данные о речном стоке. Многолетние ряды характеристик речного стока. 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

Таблица 1. Средний многолетний сток и исследуемые периоды

Река, створ	Площадь бассейна, тыс. км ²	Средний многолетний сток*, км ³	Рассмотренный период, годы:		
			весь период	базовый период	период современного глобального потепления
Волга — Волгоград	1360	260	1879—2020	1931—1980	1981—2020
Кама — Пермь (Камская ГЭС)	169	53.2	1881—2010	1931—1980	1981—2010
Дон — Раздорская	378 (422**)	24.3 (26.1****)	1891—2019	1931—1980	1981—2019
Сев. Двина — Усть-Пинега	348 (357**)	104.9	1882—2020	1931—1980	1981—2020
Печора — Усть-Цильма	248 (322**)	110.4 (134****)	1932—2020	1932—1980	1981—2020
Обь — Салехард	2450 (2890***)	404	1936—2016	1936—1980	1981—2016
Иртыш — Тобольск	969	69	1891—2016	1931—1980	1981—2016
Енисей — Игарка	2470 (2620**)	592	1936—2016	1936—1980	1981—2016
Ангара — Богучаны	866	110	1945—2016	1945—1980	1981—2016
Ангара — Пашки (Иркутская ГЭС)	571	62.1	1899—2020	1931—1980	1981—2020
Лена — Кюсюр	2430 (2490**)	542	1936—2019	1936—1980	1981—2019
Вилуй — Хатырык-Хомо	452 (454**)	48.3	1937—2010	1937—1980	1981—2010

Примечания: * пояснения приведены в этом разделе; ** площадь бассейна до устья; *** площадь бассейна с учетом бессточных территорий; **** наблюдаемый сток в замыкающем створе.

и Богучаны, Лена — Кюсюр, Вилюй — Хатырык-Хомо (табл. 1). 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, Вилюя (Георгиади, Милюкова, 2023а; Arctic ..., 2021; Georgiadi et al., 2023; Milyukova et al., 2020). Ряды стока Ангары у с. Пашки были получены по связям с реконструированными средними месячными уровнями воды Байкала (Sinyukovich et al., 2024), а Волги на основе метода рек индикаторов климатических изменений (Георгиади и др., 2014).

Границы гидрологических сезонов, которые принимались постоянными, были определены на основе анализа многолетних данных о средних суточных и средних месячных расходах воды, а также о средних многолетних данных о замерзании рек и разрушении ледового покрова.

Годовой расчетный сток. Изменения годового стока рек для периода наблюдений и периода сценарных его изменений были рассчитаны на основе метода годового водного баланса и осредненных данных, полученных на ансамбле глобальных климатических моделей программы CMIP5 о годовых атмосферных осадках и годовом испарении и уравнении водного баланса. Расчеты проведены для замыкающих створов рек, перечисленных в табл. 1 (кроме Камы, Иртыша и Ангары), а также для Невы (площадь бассейна 281 тыс. км², годовой наблюдаемый сток 74.3 км³), Днепра (504 тыс. км², 53.5 км³), Амура (1850 тыс. км², 338 км³) и Колымы (635 тыс. км², 123 км³).

Данные глобальных климатических моделей об изменениях атмосферных осадков, испарения и температуры воздуха. Основу для оценок изменений речного стока составили средние ансамблевые климатические сценарии, подготовленные в рамках программы CMIP5 (Meehl and Bony, 2011; KNMI¹). Были использованы те из четырех семейств сценариев, которые характеризуются наиболее (RCP8.5) и наименее (RCP2.6) интенсивным ростом средней глобальной годовой температуры воздуха для периодов 2010–2039 и 2040–2069 гг. Более подробно они рассмотрены в публикациях авторов (Георгиади, Милюкова, 2023; Georgiadi et al., 2021).

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 Вилюя у с. Хатырык-Хомо в качестве входных данных для проведения расчетов на модели месячного водного баланса (ММББ 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 Project², 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).

МЕТОДЫ

Метод оценки изменений стока в период современного потепления, основанный на 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. Такой подход довольно широко используется не только для оценки влияния на речной сток климатических изменений, но также и антропогенных воздействий (Водные ..., 2008; Георгиади и др., 2019; Научно-прикладной ..., 2021). За начало периода современного глобального потепления использовали 1981 г. А базовым служил период с 1930-х годов до 1980 г., принятый для исчисления многолетних норм гидрологических характеристик³.

В качестве временной границы между ними, как правило, принимаются годы из периода 1970–1980 гг. (Водные ..., 2008; Георгиади и др., 2019; Научно-прикладной ..., 2021). 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 (Водные ..., 2008; Георгиади, Милюкова, 2023а, 2023б; Георгиади и др., 2011, 2014; Научно-прикладной ..., 2021; Georgiadi and Groisman, 2022, 2023; Georgiadi et al., 2021, 2023). Отметим, однако, что, как было показано на основе анализа долговременных фаз в многолетних изменениях годовой и зимней температуры воздуха (Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади, Милюкова, 2023б; Георгиади и др., 2011, 2014),

¹ KNMI Climate Explorer. https://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip5.cgi?id=someone@somewhere (дата обращения 26.08.2024).

² <https://www.isimip.org/> (дата обращения 26.08.2024).

³ Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество: Ежегод. изд. Л., СПб.: 1982–2022 гг.

переход к фазе повышенной годовой и зимней температуры воздуха, осредненной по территории бассейнов крупных рек (Волги, Дона, Печоры, Енисей, Лены), 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 (Даниленко, Георгиади, 2022; Шпакова, Wang, 2023; Georgiadi et al., 2023). 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 (Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади, Милюкова, 2023б; Георгиади и др., 2014). 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), 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 (Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади, Милюкова, 2023а, 2023б; Георгиади и др., 2014; Frolova et al., 2022).

Модель месячного водного баланса Института географии РАН. Это модель, 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 и расчеты выполняются для 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 (Георгиади, Милюкова, 2023б; Georgiadi et al., 2021). На основе сравнения расчетных значений годового стока базового периода, периодов современного и сценарного глобального потепления оценивались его относительные изменения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменения речного стока в период современного глобального потепления. *Оценки, полученные на основе многолетних рядов годового и сезонного стока.* Оценки изменений стока основывались на рядах стока 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 стоком, приведенным к естественным условиям): Волга — Волгоград, Дон — Раздорская, Обь — Салехард, Иртыш — Тобольск, Енисей — Игарка, Ангара — Пашки и Богучаны, Лена — Кюсюр, Вилкой — Хатырык-Хомо.

В период современного глобального потепления на реках южного макросклона Русской равнины (Волга — г. Волгоград, Кама — г. Пермь, Дон — станица Раздорская) и северного (Северная Двина — с. Усть-Пинега, Печора — с. Усть-Цильма) и крупнейших арктических рек Сибири (Обь — г. Салехард, Енисей — г. Игарка, Лена — с. Кюсюр) наиболее заметно по сравнению с базовым периодом увеличился зимний сток (рис. 1). Его рост на этих реках составил 18–59%. Также и на Ангаре в створах с. Пашки (вблизи ее истока) и с. Богучаны (недалеко от ее

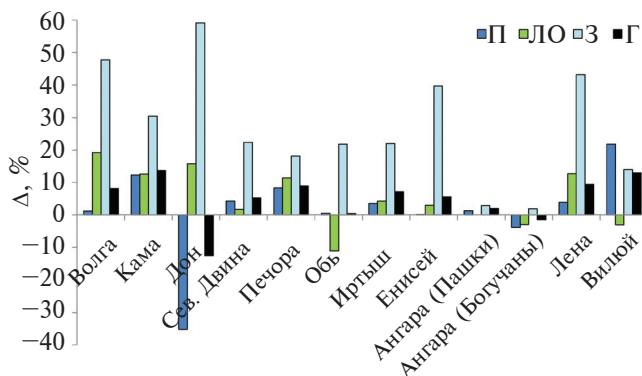


Рис. 1. Относительные изменения (Δ , %) стока половодья (П), летне-осеннего (ЛО), зимнего (З) и годового (Г) стока в период современного глобального потепления (начиная с 1981 г.) в сравнении со стоком базового периода (1930–40-е — 1980 гг.), рассчитанные по многолетним данным о стоке, из которых исключены антропогенные изменения. Информация о створах приведена в табл. 1.

устья) увеличение зимнего стока было наибольшим в сравнении со стоком других гидрологических сезонов и годового стока, но его повышение было малозаметным и составляло соответственно 3 и 2%. На Вилюе в створе пос. Хатырык-Хомо, хотя повышение зимнего стока было весьма значительным (15%), оно было меньше, чем рост стока снегового половодья (почти 24%). Меньшим, но также ощутимым, было увеличение стока снегового половодья на Каме (более 12%) и на Печоре (более 8%).

Также заметным было увеличение летне-осеннего стока на Волге (19%), Дону (около 15%), Печоре и Лене (более 10%). Только на четырех реках наблюдалось уменьшение стока за год и различные сезоны года. Наибольшее снижение стока половодья (более 35%) и годового стока (более 12%) отмечается на Дону, а летне-осеннего стока на Оби (11%). Весьма незначительно снижение стока половодья и летне-осеннего стока выявлено на Ангаре у с. Богучаны и летне-осеннего стока на Вилюе.

Характер различий в стоке между периодом современного глобального потепления и базовым периодом во многом обусловлен особенностями долговременных фаз повышенного/пониженного годового стока и стока основных гидрологических сезонов (их продолжительностью, временем смены контрастных фаз, масштабом различий их среднего стока). При этом наибольшая разница в стоке контрастных фаз отмечается для зимнего сезона (также, в большей мере, это характерно для летне-осеннего сезона, прежде всего на реках южного макросклона Русской равнины). Самые значительные различия в зимнем стоке сравниваемых периодов связаны с тем, что, как правило, с 1930-х годов наблюдались две длительные контрастные фазы. В базовый период формировалась фаза пониженного стока, а в период современного глобального потепления фаза повышенного стока. При этом смена этих фаз произошла на рубеже 1970–1980-х годов, то есть в начале периода современного глобального потепления. Исключение, например, составляет Ангара, на которой формировались относительно короткие контрастные фазы и в сравниваемые периоды (базовый и период современного потепления) наблюдались по две таких фазы в каждом из них, что и приводило к незначительной разнице в среднем стоке между ними.

Оценки изменения годового стока, полученные на основе средних ансамблевых модельных климатических данных и уравнения водного баланса. Они основаны на сравнении результатов расчетов годового стока Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены и Вилюя для периода современного глобального потепления (1981–2010 гг.) и для базового периода (1931–1980 гг.),

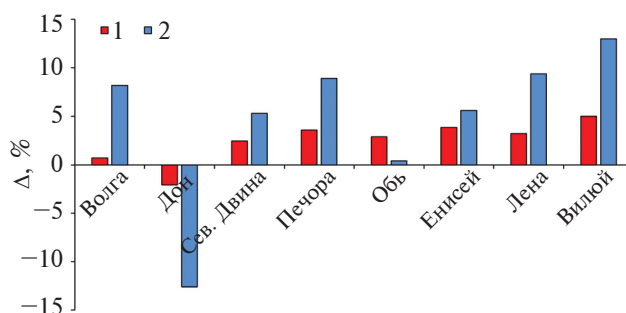


Рис. 2. Относительные изменения годового стока (Δ , %) в период современного глобального потепления в сравнении со стоком базового периода, рассчитанные по уравнению водного баланса и данным об атмосферных осадках и температуре воздуха, осредненным по ансамблю глобальных климатических моделей программы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

полученных по уравнению среднего многолетнего годового водного баланса с использованием модельных климатических данных о средних ансамблевых годовых суммах атмосферных осадков и испарении, осредненных по территории речных бассейнов. Эти оценки по знаку изменений среднего годового стока совпадают с аналогичными оценками, полученными на основе многолетних рядов данных о восстановленном (условно-естественном) годовом стоке (рис. 2). Однако разница в стоке двух сравниваемых периодов, рассчитанная на основе модельных данных для большинства рек меньше разницы в годовом стоке, определенной для тех же рек по наблюдаемым данным за исключением Оби. При этом относительные изменения стока, полученные двумя методами достаточно тесно связаны между собой ($R^2 = 0.68$).

Сценарные изменения стока. *Годовой и сезонный сток по данным расчетов на модели месячного водного баланса Института географии РАН.* Сравнение характера изменений годового и сезонного стока Вилюя, Волги и Дона в условиях современного и сценарного глобального потепления, рассчитанных, соответственно, по данным наблюдений (см. рис. 1) и по результатам численных экспериментов на ММВБ ИГ РАН и сценарным данным об атмосферных осадках и температуре воздуха, осредненным по ансамблю глобальных климатических моделей программы CMIP5, показывает как сходства, так и различия в оценках сценарных изменений годового и сезонного стока на этих реках (рис. 3).

Для Волги как в условиях наблюдаемого потепления, так и в условиях наиболее и наименее интенсивного глобального потепления в сценарный период (2010–2039 гг.) зимний и годовой сток, а также сток половодья увеличивается.

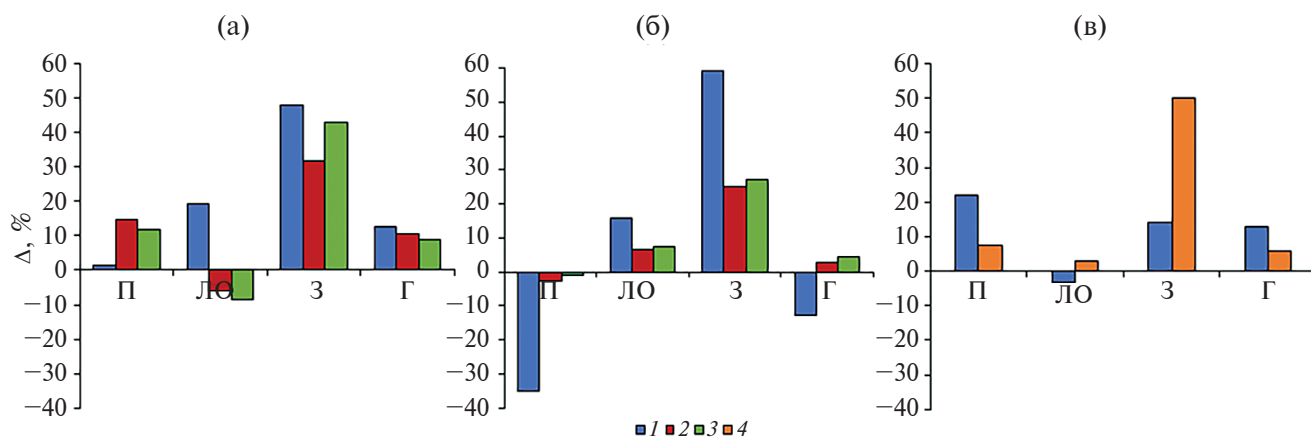


Рис. 3. Относительные изменения (Δ , %) годового стока (Г), стока половодья (П), летне-осеннего (ЛО) и зимнего (З) стока Волги (а), Дона (б) и Вилуя (в): в период современного глобального потепления в сравнении со стоком базового периода рассчитанные по многолетним данным о стоке с исключенными антропогенными 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). Более детальная информация — в тексте.

Тогда как летне-осенний сток в период современного потепления повышается, а в сценарных условиях он может снизиться. При этом при современном наблюдаемом потеплении повышение зимнего и годового стока остается более заметным, чем в сценарных условиях, а сценарное повышение стока половодья может намного превышать изменение его объема, которое наблюдалось в период современного потепления.

На Дону соотношение современных и сценарных изменений аналогично характеру изменений на Волге только для зимнего стока. Тогда как сток половодья на Дону (в отличие от Волги), как при современном, так и сценарном потеплении снижается (в сценарных условиях в гораздо меньшей степени). А вот летне-осенний сток, также как и зимний повышается. При этом

годовой сток в сценарных условиях может увеличиться, тогда как при современном потеплении он снижался.

На Вилуе как при современном, так и сценарном потеплении направленность изменений стока половодья, зимнего и годового стока такая же, как на Волге (см. рис. 3). При этом, однако, сценарные изменения годового стока меньше, а стока половодья больше современных (они зеркальны относительно характера его изменений на Волге). Сценарный же летне-осенний сток на Вилуе может снижаться, тогда как и на Волге и Дону он, вероятно, будет выше современного.

Годовой сток по результатам воднобалансовых расчетов и сценарным данным глобальных климатических моделей. При наименее (RCP2.6)

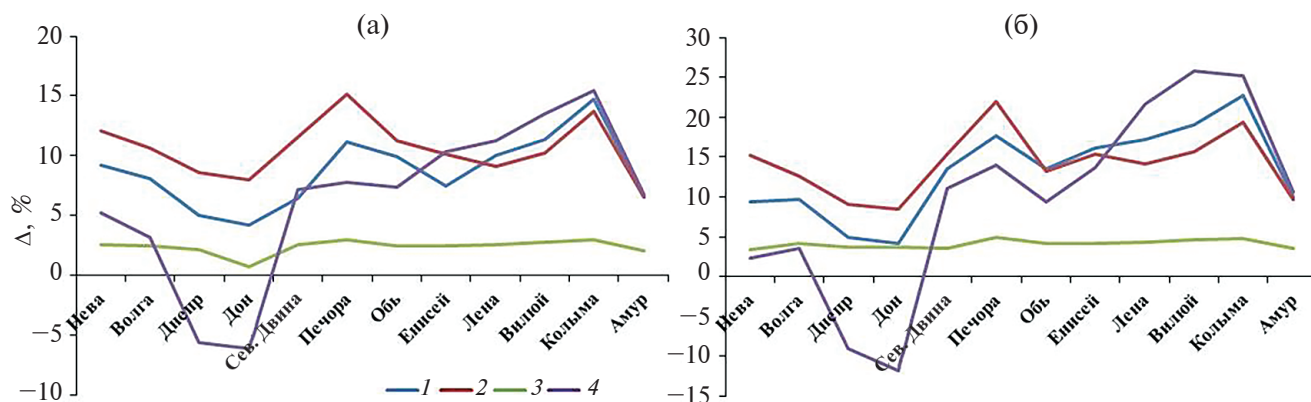


Рис. 4. Сценарные изменения (Δ , %) годовых сумм атмосферных осадков (1), годового испарения (2), годовой температуры воздуха, Δ , °C (3), годового стока в период сценарного потепления 2040–2069 гг. в сравнении со стоком базового периода (4) для сценариев RCP2.6 (а) и RCP8.5 (б).

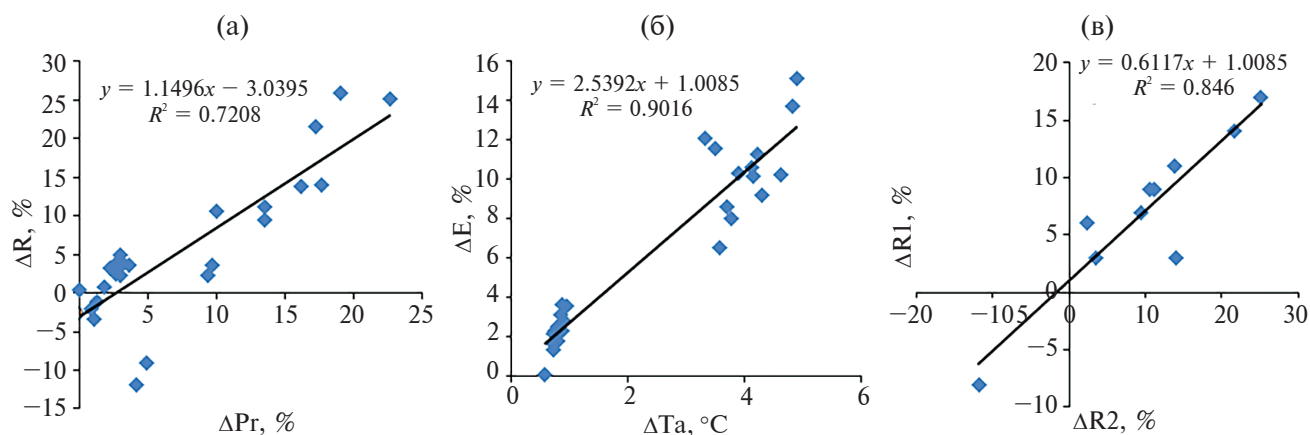


Рис. 5. Регрессионные зависимости между относительными (%) сценарными изменениями, полученными для рассмотренных крупных речных бассейнов по данным ансамбля глобальных климатических моделей по климатическому сценарию RCP8.5 программы CMIP5: (а) годового стока и годовых атмосферных осадков для периода 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 ($\Delta R1$).

и наиболее (RCP8.5) интенсивном потеплении в 2040–2069 гг. годовая температура воздуха в рассматриваемых крупных речных бассейнах повысится соответственно на 0.8–3.0 и 3.3–4.9°C, годовая сумма атмосферных осадков на 4–15 и 4–22%, а суммарное испарение на 6–15 и 8–22% (рис. 4). Годовой сток в этих условиях для большинства рассмотренных рек может увеличиться 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).

Сценарные отклонения (%) годового стока рассмотренных рек относительно стока базового периода довольно тесно скоррелированы с соответствующими отклонениями годовых сумм атмосферных осадков (рис. 5а), а сценарные отклонения суммарного испарения — с отклонениями годовой температуры воздуха (рис. 5б).

Приведенные оценки относительных изменений среднего многолетнего годового стока рр. 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, проведенных в гидрологических блоках глобальных климатических моделей для сценария RCP8.5 для периода 2041–2060 гг. (рис. 5в).

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 в., на основании 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 ошутимое в зимний, а также в летне-осенний гидрологические сезоны. Тогда как на Дону наряду с самым значительным из всех рассмотренных рек относительным увеличением зимнего и 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 уменьшение 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 направленности изменений годового стока Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены и Вилюя в период современного глобального потепления, рассчитанных по данным наблюдений

и по уравниванию водного баланса с использованием данных изменений атмосферных осадков и испарения, полученных осреднением результатов расчетов на ансамбле глобальных климатических моделей программы CMIP5. При этом изменения стока в период современного глобального потепления, рассчитанные по данным наблюдений, оказались на большинстве рассмотренных рек больше модельных за исключением Оби.

3. На Волге, Дону и Вилюе 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 средних ансамблевых 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 Вилюе 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, Вилюя, 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. при наименее (RCP2.6) и наиболее (RCP8.5) интенсивном потеплении, 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 связаны 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.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

FUNDING

The work was carried out within the framework of the RSF 24-27-00143 project “Russian river flow in the era of global warming.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. Вып. 145. М.: ИД “Кодекс”, 2018. С. 206–218.
- Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.
- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.
- Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Долговременные изменения стока крупнейших сибирских рек // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 5. С. 70–81.
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-70-81>
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Масштабы гидрологических изменений в бассейне реки Волги при антропогенном потеплении климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 72–79.
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Особенности долговременных фаз повышенной и пониженной водности Дона и Лены в XIX–XXI веках // Метеорология и гидрология. 2023а. № 12. С. 104–114.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-12-104-114>
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Сток Волги в эпохи глобального потепления // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023б. Т. 87. № 6. С. 804–824.
<https://doi.org/10.31857/s2587556623060079>
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милюкова И.П. О вкладе климатических и антропогенных факторов в изменения стока крупных рек Русской равнины и Сибири // ДАН. 2019. Т. 488. № 5. С. 539–544.
<https://doi.org/10.31857/s0869-56524885539-544>
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Макс Пресс, 2014. 214 с.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кислов А.В., Анисимов О.А., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Бородин О.О. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.
- Георгиевский М.В., Голованов О.Ф. Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек

- Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта СМIP5 // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. Вып. 2. С. 206–218. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.203>
- Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л., Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Оценка влияния возможных климатических изменений на гидрологический режим и водные ресурсы рек бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 89–99.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
- Даниленко А.О., Георгиади А.Г. Влияние современного потепления на водный и ионный сток Северной Двины // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 41–47. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-064-069>
- Калинин Г.П., Милуков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // Труды ЦИП. 1958. Вып. 66. 72 с.
- Катцов В.М., Говоркова В.А. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (СМIP5) // Труды ГГО. 2013. № 569. С. 76–98.
- Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколичина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов С.М., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс Пресс, 2008. 290 с.
- Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милукова И.П. О соотношении климатических и антропогенных факторов в изменении стока Волги // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 6. С. 825–834. <https://doi.org/10.31857/s2587556623060092>
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2019. 300 с.
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.К. Оценки возможных изменений регионального гидрологического режима в XXI веке, основанные на глобальных климатических моделях // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2003. № 39. С. 130–144.
- Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: ООО “РИАЛ”, 2021. 190 с.
- Шпакова Р.Н., Wang P. Изменение характера многолетних колебаний стока рек Южной Якутии и прилегающих районов российского Дальнего Востока в условиях глобального потепления // Российская Арктика. 2023. Т. 5 (1). С. 33–44. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-1-33-44>
- Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems / D. Yang, D.L. Kane (Eds.). Cham: Springer, 2021. 914 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9>
- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V. Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data // Water Res. 2022. Vol. 49. P. 333–350. <https://doi.org/10.1134/s0097807822030046>
- Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. Runoff of Russian Rivers under Current and Projected Climate Change: a Review 2. Climate Change Impact on the Water Regime of Russian Rivers in the XXI Century // Water Res. 2022. Vol. 49. P. 351–365. <https://doi.org/10.1134/s0097807822030058>
- Georgiadi A.G. Change of the hydrological cycle under the influence of global warming // IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences). Hydrology for the Water Management of Large River Basins. 1991. P. 119–128.
- Georgiadi A.G., Groisman P.Ya. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora // Environ. Res. Let. 2022. Vol. 17. № 8. P. 1–14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Extreme Low Flow during Long-Lasting Phases of River Runoff in the Central Part of the East European Plain // Water. 2023. Vol. 15. № 12. Art. 2146. <https://doi.org/10.3390/w15122146>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers // Polarforschung. 2018. Vol. 87 (2). P. 167–176. <https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.167>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Response of River Runoff in the Cryolithic Zone of Eastern Siberia (Lena River Basin) to Future Climate Warming // Environmental Change in Siberia. Advances in Global Change Research / H. Balzter (Ed.). Dordrecht: Springer, 2010. Vol. 40. P. 157–169. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8641-9_10
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin // Water Res. 2021. Vol. 47. № 6. P. 913–923. <https://doi.org/10.1134/s0097807820060068>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusarov A.V. Water Flow Changes in the Don River (European Russia) During 1891–2019 // Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16. № 2. P. 6–17. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-083>
- Harding R., Best M., Blyth E., Hagemann S., Kabat P., Tallaksen L.M., Warnaars T., Wiberg D., Weedon G.P., van Lanen H.A. I., Ludwig F., Haddeland I. WATCH: Current knowledge of the Terrestrial global water cy-

- cle // J. Hydrometeorol. 2011. Vol. 12. P. 1149–1156. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-024.1>
- Kalugin A. Climate change effects on river flow in Eastern Europe: Arctic rivers vs. Southern rivers // Climate. 2023. Vol. 11. Art. 103. <https://doi.org/10.3390/cli11050103>
- Meehl G.A., Bony S. Introduction to CMIP5 // CLIVAR exchanges — Special Issue: WCRP Coupled Model Intercomparison Project — Phase 5 — CMIP5. 2011. № 56. Vol. 16. P. 4–5.
- Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O. Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers // E3S Web Conf. 2020. Vol. 163. Art. 05008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305008>
- Sinyukovich V.N., Georgiadi A.G., Groisman P.Y., Borodin O.O., Aslamov I.A. The Variation in the Water Level of Lake Baikal and Its Relationship with the Inflow and Outflow // Water. 2024. Vol. 16. № 4. Art. 560. <https://doi.org/10.3390/w16040560>

Water Flow of the Largest Russian Rivers in Modern and Scenario Global Warming

A. G. Georgiadi^{a,*}, I. P. Milyukova^a, O. O. Borodin^{a,b}, and E. A. Barabanova^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: georgiadi@igras.ru

The results of a comparative study of the changes in the flow of the large rivers of the Russian Plain (Volga, Don, Northern Dvina, Pechora, Neva rivers), Siberia (Ob, Irtysh, Yenisei, Angara, Lena, Vilyui rivers) and the Far East (Amur River) under conditions of modern global warming and during the period of scenario anthropogenic climate changes in the 21st century are presented. It is based on a comparison of the annual and seasonal river runoff of the reference period and the period of modern global warming; calculations based on the monthly water balance model developed at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences; estimates of changes in annual river flow obtained by the method of the average long-term annual water balance and atmospheric precipitation and evaporation data calculated within the framework of the CMIP5 program on an ensemble of global climate models for periods of modern and scenario global warming. During the period of modern global warming, compared with the previous base period, an increase in annual runoff and runoff of the main hydrological seasons was observed on the Volga, Kama, Don, Northern Dvina, Pechora, Ob, Irtysh, Yenisei, Angara, Lena and Vilyui rivers, especially noticeable in winter, as well as in summer-autumn hydrological seasons. Whereas, on the Don, along with the most significant of all the rivers considered, the relative increase in winter runoff, as well as a noticeable increase in summer-autumn runoff, the greatest decrease in snow-melt flood runoff, as well as annual runoff, was revealed. The coincidence of the sign of changes in the annual runoff of the Volga, Don, Northern Dvina, Pechora, Ob, Yenisei, Lena and Vilyui rivers during the period of modern global warming, calculated from observations and the equation of water balance using atmospheric precipitation and evaporation data obtained by averaging the results of calculations on the ensemble of global climate models of the CMIP5 program, has been established. Relative scenario changes in the annual runoff of the Volga, Neva, Northern Dvina, Pechora, Ob, Yenisei, Lena, Vilyui, Kolyma and Amur rivers in comparison with the runoff of the base period correlate quite closely with the corresponding changes in annual atmospheric precipitation amounts, and scenario changes in total evaporation with changes in annual air temperature.

Keywords: modern and scenario global warming, large rivers, climatic changes in annual and seasonal river water flow, monthly water balance model, mean annual water balance equation, global climate models of the general circulation of the atmosphere and ocean

REFERENCES

- Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*. Yang D., Kane D.L., Eds. Cham: Springer, 2021. 914 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9>
- Bolgov M.V., Filippova I.A., Osipova N.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D. Modern features of the hydrological regime of the rivers of the Volga basin. In *Voprosy geografii. Sb. 145* [Problems of Geography. Vol. 145]. Moscow: Kodeks Publ., 2018, pp. 206–218. (In Russ.).
- Budyko M.I. *Klimat v proshlom i budushchem* [Climate in the Past and Future]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1980. 352 p.
- Danilenko A.O., Georgiadi A.G. The influence of modern climate warming on the water flow and major ion flux of the Northern Dvina. *Teoretich. Priklad. Ekol.*, 2022, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-064-069>
- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Gri-gor'ev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchen-

- ko A.I. Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: A review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water Resour.*, 2022, vol. 49, pp. 333–350.
<https://doi.org/10.1134/s0097807822030046>
- Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. Runoff of Russian Rivers under Current and Projected Climate Change: a Review 2. Climate Change Impact on the Water Regime of Russian Rivers in the XXI Century. *Water Resour.*, 2022, vol. 49, pp. 351–365.
<https://doi.org/10.1134/s0097807822030058>
- Georgiadi A.G. Change of the hydrological cycle under the influence of global warming. In *IAHS Publication. Hydrology for the Water Management of Large River Basins*, 1991, pp. 119–128.
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Extreme low flow during long-lasting phases of river runoff in the central part of the East European Plain. *Water*, 2023, vol. 15, no. 12, art. 2146.
<https://doi.org/10.3390/w15122146>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Ya. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora. *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17, no. 8, pp. 1–14.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A. Long-term changes in the runoff of the largest Siberian rivers. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 5, pp. 70–81. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-70-81>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of the largest Siberian rivers. *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, pp. 167–176.
<https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.167>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Contribution of climatic and anthropogenic factors to changes in the flow of large rivers of the Russian Plain and Siberia. *Dokl. Earth Sci.*, 2019, vol. 488, pp. 1211–1216.
<https://doi.org/10.1134/s1028334X19100106>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsennarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* [Modern and Scenario Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don Rivers]. Moscow: Max Press Publ., 2014. 214 p.
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kislov A.V., Anisimov O.A., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Borodin O.O. *Stsennarnaya otsenka veroyatnykh izmenenii rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 1. Bassein reki Leny* [Scenario Assessment of Probable Changes in River Runoff in the Basins of the Largest Rivers of Russia. Part 1. The Lena River Basin]. Moscow: Max Press Publ., 2011. 179 p.
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. The scale of hydrological changes in the Volga River basin under anthropogenic warming. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2002, no. 2, pp. 72–79. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Peculiarities of long-term phases of the increased and decreased Don and Lena runoff in the 19th–21st Centuries. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, pp. 1066–1075.
<https://doi.org/10.3103/S1068373923120075>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and scenario changes in river runoff in the Don basin. *Water Resour.*, 2021, vol. 47, no. 6, pp. 913–923.
<https://doi.org/10.1134/s0097807820060068>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Response of river runoff in the cryolithic zone of Eastern Siberia (Lena River basin) to future climate warming. In *Environmental Change in Siberia. Advances in Global Change Research*. Balzter H., Ed. Dordrecht: Springer, 2010, vol. 40, pp. 157–169.
https://doi.org/10.1007/978-90-481-8641-9_10
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Volga runoff in the era of global warming. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 804–824. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/s2587556623060079>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusev A.V. Water flow changes in the Don River (European Russia) during 1891–2019. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 6–17.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-083>
- Georgievskii M.V., Golovanov O.F. Forecasting changes in river water resources of Russian Federation based on CMIP5 runoff data. *Vestn. S.-Petersb. Univ. Nauki Zemle*, 2019, no. 2, pp. 206–218. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.203>
- Georgievsky V.Yu., Yezhov A.V., Shalygin A.L., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I. Assessment of the impact of possible climatic changes on the hydrological regime and water resources of rivers of the former USSR. *Meteorol. Hydrol.*, 1996, no. 11, pp. 89–99.
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i vlagobmena poverkhnosti sushy s atmosferoi* [Modeling of Heat and Moisture Exchange Between the Land Surface and the Atmosphere]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 327 p.
- Harding R., Best M., Blyth E., Hagemann S., Kabat P., Tallaksen L.M., Warnaars T., Wiberg D., Weedon G.P., van Lanen H.A. I., Ludwig F., Haddeland I. WATCH: Current knowledge of the Terrestrial global water cycle. *J. Hydrometeorol.*, 2011, vol. 12, pp. 1149–1156.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-024.1>
- Kalinin G.P., Milyukov P.I. Approximate calculation of unsteady movement of water masses. *Tr. TsIP*, 1958, no. 66. 72 p. (In Russ.).

- Kalugin A. Climate change effects on river flow in Eastern Europe: Arctic rivers vs. Southern rivers. *Climate*, 2023, vol. 11, art. 103.
<https://doi.org/10.3390/cli11050103>
- Kattsov V.M., Govorkova V.A. Expected surface air temperature, precipitation and annual runoff changes over the territory of Russia: projections with an ensemble of global climate models (CMIP5). *Tr. GGO*, 2013, no. 569, pp. 75–97. (In Russ.).
- Kislov A.V., Evstigneev V.M., Malkhazova S.M., Sokolikhina N.N., Surkova G.V., Toropov S.M., Chernyshev A.V., Chumachenko A.N. *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v usloviyakh potepleniya XXI veka* [Forecast of the East European Plain Climatic Resource Availability in the Conditions of Warming in the 21st Century]. Moscow: Max Press Publ., 2008. 290 p.
- Koronkevich N.I., Georgiadi A.G., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. On the ratio of climatic and anthropogenic factors in the change of the Volga River runoff. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 825–834. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/s2587556623060092>
- Meehl G.A., Bony S. Introduction to CMIP5. *CLIVAR exchanges — Special Issue: WCRP Coupled Model Intercomparison Project — Phase 5 — CMIP5*, 2011, no. 56, vol. 16, pp. 4–5.
- Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O. Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers. *E3S Web Conf.*, 2020, vol. 163, art. 05008.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305008>
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.K. Estimates of possible regional hydrologic regime changes in the 21st century based on global climate models. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fizika Atmosf. Okeana*, 2003, no. 39, pp. 130–144. (In Russ.).
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseinov* [Runoff Formation Models in Challengers of River Basin Hydrology]. Moscow: Izd-vo Ross. Akad. Nauk, 2019. 300 p.
- Nauchno-prikladnoi spravochnik: Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii* [Applied Scientific Reference Book: Long-term Fluctuations and Variability of Water Resources and Main Characteristics of River Runoff in the Russian Federation]. St. Petersburg: RIAL Publ., 2021. 190 p.
- Shpakova R.N., Wang P. Change in perennial runoff fluctuations of the rivers in South Yakutia in the context of global warming. *Ross. Arktika*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 33–44. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-1-33-44>
- Sinyukovich V.N., Georgiadi A.G., Groisman P.Y., Borodin O.O., Aslamov I.A. The variation in the water level of lake Baikal and its relationship with the inflow and outflow. *Water*, 2024, vol. 16, no. 4, art. 560.
<https://doi.org/10.3390/w16040560>
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg: Gos. Gidrolog. Inst., 2008. 600 p.