

Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз

А.Н. Гельфан^{1, 2)}, Н.Л. Фролова²⁾, Д.В. Магрицкий²⁾,
М.Б. Киреева²⁾, В.Ю. Григорьев^{1, 2)}, Ю.Г. Мотовилов¹⁾, Е.М. Гусев¹⁾*

¹⁾ Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3

²⁾ МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши,
Россия, 119991, Москва, Воробьевы горы, д. 1,

* адрес для переписки: *hydrowpi@mail.ru*

Реферат. В статье представлен обзор публикаций, посвященных оценкам изменений водного режима рек России в условиях современных и прогнозируемых изменений климата. Последние по времени обобщения соответствующих публикаций содержатся в оценочных докладах Росгидромета. После выхода в свет этих фундаментальных трудов было опубликовано большое число исследований, уточняющих выводы национальных докладов. Цель настоящего обзора – обобщить современные представления о влиянии изменения климата на территории Российской Федерации на средний годовой и максимальный сток рек, прежде всего, на основе публикаций последних лет. Обзор состоит из двух частей. В первой представлены результаты диагноза изменений многолетних норм годового и максимального стока рек России, происходящих за период инструментальных наблюдений в XX-м – начале XXI века. Ввиду географических различий в направленности и величине климатических изменений и связанных с ними изменений водного режима рек обзор дан отдельно по результатам, полученным для рек Европейской и Азиатской территорий России. Показано, что для годового стока в среднем на территории Европейской России в последние десятилетия проявляется тенденция к увеличению, связанная с общим ростом увлажненности территории. Однако для большинства проанализированных водосборов изменения носят статистически незначимый характер. С территории Сибири и Дальнего Востока годовой сток рек в арктические моря России также незначительно, в среднем, увеличился. Изменения максимального стока более выражены и носят разнонаправленный характер. Во второй части статьи дан обзор публикаций, в которых представлены сценарные прогнозы возможных изменений водного режима рек России до конца XXI века, полученные на основе ансамблевых экспериментов с моделями климата или с региональными гидрологическими моделями. Подтверждены выводы, содержащиеся во Втором оценочном докладе Росгидромета, о незначительных положительных аномалиях нормы годового стока для большей части территории России при умеренных сценариях антропогенного потепления в XXI веке. Наибольшие

положительные аномалии максимального талого и дождевого стока в XXI веке возможны на крупных реках Сибири при реализации сценария RCP8.5 антропогенного радиационного воздействия.

Ключевые слова. Речной сток, изменение климата, современные изменения, сценарный прогноз, обзор публикаций.

Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnosis and projections

A. Gelfan^{1, 2)}, N. Frolova²⁾, D. Magritsky²⁾, M. Kireeva²⁾,
V. Grigoriev^{1, 2)}, Yu. Motovilov¹⁾, E. Gusev¹⁾*

¹⁾ Water Problems Institute of RAS,
3, Gubkina Str., 119333, Moscow, Russian Federation

²⁾ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Hydrological Dep.,
1, Vorob'evy Gory, 119991, Moscow, Russian Federation

* Correspondence address: *hydrowpi@mail.ru*

Abstract. The article provides an overview of publications devoted to assessments of changes in the water regime of Russian rivers under the conditions of current and projected climate changes. The most recent generalizations of the relevant publications are contained in the national assessment reports of Roshydromet. Since the publication of these fundamental works, a large number of studies have been published, clarifying the conclusions of the national reports. The purpose of this review is to summarize modern ideas about the impact of climate change on the territory of the Russian Federation on the average annual and maximum river flow, primarily based on the publications in recent years. The review is divided into two parts. The first section presents the results of the diagnosis of changes in the long-term norms of the annual and maximum flow of Russian rivers occurring during the period of instrumental observations in the XXth – early XXIst centuries. Due to the geographical differences in the direction and magnitude of climatic changes and associated changes in the water regime of rivers, the review is given separately based on the results obtained for the rivers of the European and Asian territories of Russia. It is shown that for the annual runoff over the territory of European Russia in recent decades, there is a tendency to increase, associated with a general increase in the moisture content of the territory. However, for most of the analyzed river basins, the changes are statistically insignificant. From the territory of Siberia and the Far East, the annual flow of rivers into the Arctic seas of Russia also slightly increased, on average. Changes in the maximum runoff are more pronounced and spatially heterogeneous. The second part of the article provides an overview of publications that present projections of changes in the water regime of Russian rivers until the end of the XXIst century. The projections obtained on the basis of ensemble experiments with climate models or with regional hydrological models are overviewed. The conclusions contained in

the Second Assessment Report of Roshydromet about insignificant positive anomalies of the annual runoff rate for most of the territory of Russia under moderate anthropogenic warming scenarios in the XXIst century have been confirmed. The largest positive anomalies of the maximum snowmelt and rainfall runoff in the XXIst century are possible on large rivers of Siberia under the implementation of the RCP8.5 scenario of anthropogenic radiation impact.

Keywords. River runoff, climate change, modern changes, scenario forecast, review of publications.

Введение

В конце 2019 г. Правительство РФ утвердило Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г. Первая задача утвержденного плана сформулирована как «научное обеспечение процесса разработки и принятия решений, направленных на повышение уровня безопасности от последствий изменений климата для населения и экономики, включая опасные природные явления и чрезвычайные ситуации природного характера» (Распоряжение..., 2019). Водная безопасность – важная составляющая национальной безопасности (Данилов-Данильян, Гельфан, 2015) – подвергается нарастающим угрозам в связи с изменением климата, как в нашей стране, так и во всем мире, что подтверждается национальными (Второй оценочный доклад..., 2014; Доклад..., 2017) и международными (Jiménez Cisneros et al., 2014) оценочными докладами. Мероприятия по смягчению водного дефицита, управлению риском наводнений, охране природных вод и водных экосистем традиционно опираются в своей методической основе на гипотезу о стационарности гидрологических процессов – гипотезу, которая в современных условиях может нарушаться и для каждого конкретного региона нуждается в дополнительном обосновании (Георгиевский и др., 2014; Kundzewicz et al., 2018). В этой связи разработка и принятие решений по адаптации водохозяйственного комплекса России к изменению климата должны быть обеспечены надежной информацией о влиянии происходящих и прогнозируемых изменений климата на водные ресурсы и максимальный сток речных бассейнов России. Последние обобщения этой информации содержатся в оценочных докладах Росгидромета о влиянии изменения климата на гидрологические системы суши (Георгиевский и др., 2014) и опасные гидрологические явления (Доклад..., 2017). После выхода в свет этих фундаментальных трудов было опубликовано большое число исследований, уточняющих выводы национальных докладов. Цель настоящего обзора – обобщить современные представления о влиянии изменения климата на территории Российской Федерации на средний годовой (водные ресурсы) и максимальный сток рек, прежде всего, на основе публикаций последних лет.

Статья состоит из двух частей: в первой дан обзор результатов исследований изменений стока рек России за период наблюдений, во второй – исследований по оценке возможных изменений речного стока в XXI веке на основе модельных расчетов.

Изменения многолетних норм годового и максимального стока рек России: диагноз, по данным наблюдений

Для оценки происходящих изменений водного режима рек, по данным, наблюдений используются два основных подхода: (1) сравнение средних значений или показателей изменчивости характеристик стока за современный период с соответствующими величинами предшествующего (базового) периода и (2) выявление линейного тренда в данных наблюдений рассматриваемой характеристики стока. В основе обоих подходов лежит допущение о происходящем однонаправленном изменении характеристик стока под влиянием глобального потепления. Другие подходы, в частности выделение фаз повышенной и пониженной водности (см., например, Георгиади и др., 2016; Григорьев и др., 2020), не требуют подобного допущения, но интерпретация полученных с их помощью результатов оказывается более субъективной (Kundzewicz et al., 2005).

Как при расчете изменения относительно базового периода, так и линейного тренда требуется выбор начального периода изменений. В ряде работ этот период идентифицировался по ускорению роста глобальной температуры воздуха в 1970-1980-е годы (Георгиевский и др., 2019; Джамалов и др., 2014; Магрицкий, 2018; Фролова и др., 2020), в других работах учитывались иные факторы (Синюкович, Чернышев, 2019; Ушаков, 2019; Blöschl et al., 2019). Статистическая однородность рядов наблюдений относительно базового периода оценивается параметрическими тестами (Стьюдента, Фишера и др.) или непараметрическими тестами (Манна-Уитни и др.). Для оценки значимости трендов используются стандартные статистические тесты, основанные на оценке значимости коэффициента корреляции Пирсона или коэффициентов ранговой корреляции.

Несмотря на ограниченный набор количественных статистических критериев оценки значимости изменений речного стока, для одних и тех же территорий эти оценки могут различаться в работах разных авторов. Так, при оценке изменения стока с помощью линейного тренда величина тренда относится к среднему за весь период, в то время как при сравнении за два периода сравнение проводится относительно к базовому периоду. Также из-за различий в среднемноголетней величине модуля стока в пределах речного бассейна величина изменения стока для большей части бассейна может не совпадать не только по величине, но и по знаку с величиной, рассчитанной по замыкающему створу. В результате вывод о величине и направленности изменений речного стока зависит от того, рассматривается ли площадь, для которой характерен тот или иной знак изменения стока, или величина этого изменения для замыкающего створа.

Европейская территория России (ЕТР)

Вопросам оценки происходящих за период наблюдений изменений речного стока на ЕТР посвящено много исследований. Ряд работ фокусируется на анализе изменений конкретных характеристик или одной из фаз водного

режима всего Европейского региона в целом (Киреева и др., 2018; Kireeva et al., 2019a; Blöschl et al., 2019) или охватывают всю Россию (Георгиевский и др., 2019, Shiklomanov, Lammers, 2013). Наибольшее количество исследований касается анализа динамики характеристик конкретных фаз для частных водосборов – Волги (Георгиевский и Шалыгин, 2012; Лавров, Калужный, 2016; Frolova et al., 2017a), Дона (Киреева и др., 2017, Дмитриева, Бучик, 2016., Георгиади и др., 2020; Kireeva et al., 2019b), рек Русского Севера (Magritskiy et al., 2017; 2018; Алексеевский и др., 2015).

Годовой сток

Всесторонний анализ изменений годового стока ЕТР выполнен при участии авторов настоящей статьи в коллективной монографии (Джамалов и др., 2014), атласе (Джамалов и др., 2015), а также в работе (Фролова и др., 2020). В целом для годового стока и общих водных ресурсов Русской равнины наблюдается тенденция к их увеличению, связанная с общим ростом увлажненности территории. Однако для большинства проанализированных водосборов изменения носят статистически незначимый характер. В центральной части региона характерно некоторое увеличение годового стока рек, связанное с ростом общего увлажнения территории (Григорьев и др., 2018). Относительно повышенный годовой сток характерен для восточного макросклона Русской равнины – бассейнов Камы и северных рек, берущих начало со склонов Урала. Наиболее заметные изменения годового стока выражаются в его снижении и наблюдаются для рек южной (засушливой) половины Русской равнины – бассейнов Дона, Оки, Нижней Волги. Здесь для замыкающих створов наиболее крупных рек выделяется статистически достоверный тренд снижения годового стока (Джамалов и др., 2015).

Для рек Русского Севера – Онеги, Северной Двины – характерен возрастающий тренд в значениях годового стока на 20-40 мм за период 1976-2017 гг. (Magritskiy, 2018) по сравнению с предшествующим. Для рек Кольского полуострова, Карелии, бассейна Онеги наблюдается увеличение годового стока в среднем на 12%. Исключение – р. Мезень, на которой годовой сток почти не растет, а в некоторые периоды даже снижается (Magritskiy, 2018). Схожие результаты были получены и в работе коллектива авторов (Джамалов и др., 2016).

В бассейне Дона, особенно в последние 15 лет, наблюдается снижение годового стока для главной реки и, частично, для ее основных притоков – Хопра и Медведицы (Киреева и др., 2017, Киреева и др., 2018). Снижение годового стока в замыкающем створе (ст. Раздорская) составляет около 25% по сравнению с предшествующим 15-20-летним периодом; для притоков эти изменения не имеют статистической достоверности и составляют не более 15% при осреднении за последние 40 лет по отношению к предшествующему аналогичному периоду.

Годовой сток Урала и его притоков за период инструментальных изменений претерпел существенные климатически обусловленные и антропогенные изменения, в которых прослеживается ряд важных особенностей и закономерностей (Магрицкий и др., 2018). В 1930-х и особенно в конце

1950-х гг., во второй половине 1970-х – в 1980-х гг. наблюдалась заметная смена параметров и характера многолетних колебаний годового стока. Общими для рек бассейна «точками перелома» выбраны 1958 и 1978 гг., для уточнения параметров кривых обеспеченностей – только 1958 г. С переходом от условно-естественного периода, завершившегося, по сути, в 1957 г., к периодам нарастания (1958-1977 гг.) и максимальной (с 1978 г.) водохозяйственной нагрузки произошло статистически значимое (по F -test) снижение межгодовой изменчивости характеристик стока. Оно отмечено повсеместно, включая притоки и верховья р. Урал с сохранившимся условно-естественным режимом, но в большей мере – именно на зарегулированных участках русел. Отличительная особенность колебаний стока Урала в сравнении с другими большими реками ЕТР – их чрезвычайная межгодовая неравномерность.

Реки Кавказа отличаются необычайным разнообразием природных условий формирования стока. Равнинная часть территории испытывает значительное антропогенное воздействие разной интенсивности (Магрицкий, 2018). Для многих гидрологических постов Кавказа характерны пропуски в рядах измерений, а для некоторых есть основания сомневаться в достоверности полученных данных (Аксянов, 2016). В целом годовой сток рек Кавказа в замыкающих створах за 1976-2017 гг. по сравнению с 1936-1975 гг. изменялся статистически незначимо. Сток рек Черноморского побережья Кавказа вырос в среднем на 0.7%. Величина изменения составила от -6.7% для р. Западный Дагомыс до 7.8% для р. Хоста. Вырос сток рек Терек (4%) и Сулак (0.2%). Сток р. Кубань, напротив, уменьшился в пределах 5% (Магрицкий, 2018).

Оценка изменения годового стока рек Крыма чрезвычайно затруднена из-за существенного антропогенного влияния за счет регулирования прудами, водохранилищами, а также использованием рек для сельскохозяйственных и бытовых нужд. Данные по рекам, находящимся в близких к естественным условиям формирования стока (р. Черная в верховьях, р. Улу-Узень, р. Кучук-Узенбаши и др. (Богущая и др., 2020)), свидетельствуют о том, что сток за период 1980-2018 гг. увеличился по сравнению со средними значениями за 1945-1979 гг. от 5 до 30%.

Последним комплексным обобщением изменений годового стока рек и его структуры явилась работа коллектива авторов (Фролова и др., 2020). Для территории ЕТР прослеживается тенденция небольшого увеличения годового слоя стока. Сильнее всего она выражена на восточном, подветренном склоне Урала и в Предуралье. Наиболее интенсивный рост характерен для юга данной области – бассейнов рек Белой и Уфы (Фролова и др., 2020). Также рост наблюдается для левобережных притоков Верхней Волги от Рыбинского водохранилища до впадения Камы. Увеличение стока фиксируется для верховьев Днепра и отдельных притоков Северского Донца. Заметно, что практически для всей территории, за исключением северо-востока ЕТР, наблюдается увеличение роли межлетних периодов в годовом стоке. Карты слоя стока и его изменений дают важную информацию для изучения водного режима рек ЕТР (Фролова и др., 2020).

Максимальный сток

На реках ЕТР максимальные расходы воды в значительной степени формируются во время весеннего половодья. Наблюдаемые изменения водного режима характеризуются в первую очередь изменениями характеристик этой фазы водного режима. Анализ происходящих изменений посвящено большое количество работ как общего, так и регионального характера.

В работе Н.И. Коронкевича и соавторов показано, что на большей части южного макросклона Русской равнины в последние десятилетия отмечается уменьшение стока половодья (Коронкевич и др., 2018), обусловленное как климатическими, так и антропогенными факторами. По сравнению с условно естественным периодом (до 1930 г.) сток половодья Волги к настоящему времени уменьшился более чем на 4300 км^3 , а Дона – почти на 900 км^3 . Вклад антропогенных факторов в это уменьшение в бассейне Волги составил более 70%, Дона – 45%, а вклад климатических факторов – соответственно 30 и 55%. Антропогенные изменения половодья Волги и Дона, по мнению авторов работы, вызваны, главным образом, гидротехническим регулированием стока (Коронкевич и др., 2018).

Исследования Государственного гидрологического института (ГГИ) показывают, что в бассейне Волги динамика характеристик половодья носит разнонаправленный характер – для 70% рек наблюдается снижение слоя стока половодья, для 30% – рост (Лавров, Калужный, 2016). При этом лишь для одной трети изученных водосборов изменения носят статистически значимый характер (Лавров, Калужный, 2016). Для рек с отрицательным трендом снижение объема половодья в среднем за период 1978-2010 гг. составляет 10%. В целом, для 32 водосборов из 65 на Средней Волге наблюдается рост максимальных расходов воды (Лавров, Калужный, 2016).

Одно из первых исследований, посвященное анализу современных изменений стока половодья в бассейне Дона, выполнено в работе М.Б. Киреевой и Н.Л. Фроловой (Киреева, Фролова, 2013). Показано, что в последние десятилетия произошло существенное сокращение объема, слоя и максимумов половодья рек Донского бассейна, которое местами достигает 40-60%. Аналогичные результаты для Верхнего Дона получены и в других исследованиях. Так, согласно (Дмитриева, Бучик, 2016), в бассейне Верхнего Дона наблюдается снижение максимумов половодья за 2001-2014 гг. на 38-45%, а общая продолжительность половодья в бассейне Верхнего Дона и Хопра увеличилась на 15-20 суток. Наиболее современное региональное обобщение приведено в работе авторов (Kireeva et al., 2019b), которые показали, что экстремальный маловодный период в бассейне Дона в наибольшей степени выразился именно в сокращении стока половодья (на 60-80%).

Для бассейна Урала основная фаза водного режима – весеннее половодье, во время которого в условно-естественный период проходило от 75 до 85% годового стока (Магрицкий и др., 2018) и максимальные за год расходы воды. С завершением условно естественного периода параметры весеннего половодья изменились: снизилась его доля в годовом стоке – до 65-75% (за исключением р. Орь). На участках рек, испытывающих заметное антропогенное

воздействие, особенно со стороны водохранилищ, уменьшились объем и максимальные расходы половодья, начало и окончание половодья сместились на более ранние даты, изменились параметры кривых обеспеченностей и форма гидрографа половодья (Магрицкий и др., 2018).

Согласно исследованиям ГГИ (Георгиевский и др., 2019), в бассейнах Нижней Волги, Дона, Днепра, а также южной части бассейна Оки на преобладающей части рек, начиная с 1979-1983 гг., произошло снижение максимальных расходов воды на 40-60% и статистически значимое уменьшение дисперсии. Здесь неоднородными по критериям Стьюдента и Фишера оказались, соответственно, 81% и 60% всех рядов максимального стока, а значимые отрицательные тренды установлены для 93%. Для ЕТР, где максимальный сток формируется в период весеннего половодья, существенное его увеличение установлено только на весьма ограниченном числе рек, расположенных в северной части бассейна Волги, а также берущих своё начало с Уральских гор. Интересно, что изменения максимальных расходов половодья заметно выражены для рек именно с преимущественно снеговым питанием в масштабе всей Европы. В работе (Blöschl et al., 2019) регион Русской равнины (охватывающий большую часть ЕТР, частично территорию Украины, Белоруссии и Польши) выделен как отдельный, для которого характерно снижение максимумов половодья и заметное смещение дат.

За 1936-2016 гг. в высокогорных районах Кавказа наблюдалось снижение максимальных расходов воды. За этот же период на половине рек бассейна Терека наблюдается отрицательный тренд, отмечено снижение на 5-50% (Дурманов и др., 2020). Это характерно для горной и предгорной частей бассейна, в том числе для предгорных районов Дагестана. В равнинной части изменений не выявлено – незначительное снижение в бассейнах рек Терек и Сулак, и небольшой рост в бассейне Самура. Аналогичная ситуация наблюдается в верхнем и нижнем течении Кубани, где также отсутствуют статистически значимые изменения. Однако, в среднем течении Кубани выявлен рост максимальных расходов воды, составивший за рассматриваемый период 30-45%.

В работе (Дурманов и др., 2020) также было показано, что максимальные расходы дождевых паводков в 1960-2016 гг. имели тенденцию к увеличению в предгорных районах, в то время как в горах направленных изменений выявлено не было. Существенные изменения коснулись не только среднесезонных величин максимальных расходов, но и их изменчивости (среднеквадратического отклонения), а также сроков наступления (Rets et al., 2019). Изменчивость максимальных расходов за 1981-2016 гг. по сравнению с предыдущим периодом выросла на 60-120% в центральной части бассейна Кубани. В горной и предгорной частях восточной части Кавказа изменчивость максимальных расходов уменьшилась в среднем на 30%. Изменения в равнинной части рассматриваемого района разнонаправленные. Так, изменчивость максимальных расходов уменьшилась на 15-50% в бассейне Калауса, но выросла на 30-50% в верховьях бассейна Кумы. В горных районах Кубани, Терека и Сулака дата прохождения максимальных расходов сместилась на более ранние сроки, с июля на июнь, в среднем на 5-15 дней. В равнинной части Северного Кавказа максимальные расходы сместились с марта-мая на май-июнь (сдвиг на 20-80 дней).

Данные по рекам Крыма, находящимся в близких к естественным условиям формирования стока, свидетельствуют о незначительном росте максимальных расходов воды примерно на 10%.

Последним комплексным обобщением изменения максимального стока половодья рек ЕТР является работа коллектива авторов (Фролова и др., 2020). На карте изменений слоя весеннего стока прослеживается та же «диагональ», что и для годового стока, проходящая по долине Волги (Фролова и др., 2020). К юго-востоку от неё наблюдается существенное снижение слоя стока половодья, составляющее для некоторых водосборов западной части бассейна Дона величину от 25 до 50% и имеющее статистически достоверный тренд к снижению (Фролова и др., 2020). Заметно меняются и максимальные расходы воды, в частности, из-за увеличения потерь стока во время снеготаяния (Лавров, Калужный, 2016). Особенно ярко этот процесс выражен в центральной, западной и южной частях Европейской России. Наиболее интенсивное уменьшение весенних расходов воды фиксируется в бассейне Дона и Оки. Здесь с конца 1970-х годов наблюдается снижение максимальных расходов воды в среднем на 46 и 37% соответственно. Одновременно с этим заметно увеличивается разброс дат их прохождения: если раньше в среднем максимумы водности наблюдались в 1-2 декаде апреля, то в последние четыре десятилетия все чаще они наблюдаются в середине, а иногда и в начале марта. Заметно снизились весенние максимумы и в нижнем течении Волги. На западе Русской равнины также фиксируется снижение максимумов весеннего половодья, но здесь оно носит характер тенденции. Так, например, на р. Западная Двина, максимальный расход все реже превышает отметку в 1000 м³/с, за исключением 1994, 1999, 2013 гг., когда половодья были высокими, однако тренды показателей статистически незначимы для многих рек региона. Иная картина характерна для северных и восточных районов Европейской России. Здесь на средних и крупных реках тенденция снижения максимумов весеннего половодья практически не выражена.

Незначимая тенденция к увеличению максимальных расходов воды наблюдается и для левобережных притоков средней Волги – Унжи, Ветлуги и Костромы, в то время как в бассейне Вятки максимальные расходы весеннего половодья несколько снижаются. В бассейнах рек Русского Севера – Северной Двины, Печоры, Мезени – максимальные расходы воды не изменились. По тенденциям к ним же тяготеют реки бассейна Камы. Так, в створе р. Кама – пгт. Гайны – после 2000 г. заметно снизилась дисперсия колебаний, однако похожий период со значениями, близкими к среднемноголетним, наблюдался здесь и в 1950-е годы.

Азиатская территория России (АТР)

Годовой сток

Сток рек Сибири и Дальнего Востока в арктические моря России неуклонно растет с 1980-х годов, что подтверждается результатами отечественных и зарубежных исследований (Георгиади, Кашутина, 2016;

Геоэкологическое состояние..., 2007; Magritsky et al., 2018; Shiklomanov et al., 2013; 2020; Troy et al., 2012). Различаются лишь взгляды на причины, величину, хронологию, внутрибассейновые пространственные закономерности и внутригодовую структуру этой тенденции (Второй оценочный..., 2014; Георгиевский и др., 2019; Магрицкий, 2015; Магрицкий и др., 2019; Российская Арктика, 2019; Bring et al., 2016; Durocher et al., 2018 (2019); Magritsky et al., 2018; Zhang et al., 2013).

Согласно собственным данным авторов, в 1976-2017 гг. суммарный годовой сток воды в моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское вырос на 7%, по сравнению с 1936-1975 гг. У пяти главных рек, впадающих в Карское море, рост составил 3%; с водосбора морей Лаптевых и Восточно-Сибирского приток речных вод, согласно оценкам по всей длине побережья, вырос на 12 и 9% соответственно. Лишь реки водосбора Чукотского моря показали убывающую тенденцию – минус 3%. Эти изменения особенно выражены в последние 25-30 лет, что связано с наиболее интенсивным потеплением в северном полушарии и его влиянием на режим и количество осадков, снежный покров, многолетнюю мерзлоту, ледяной покров морей, циклоническую циркуляцию и, в результате, на речной сток. Тогда как влияние хозяйственной деятельности, в отличие от рек южных морей, на общие водные ресурсы основных рек этой части страны минимальное и статистически незначимое (Геоэкологическое состояние..., 2007; Магрицкий, 2018, Магрицкий и др., 2019; Shiklomanov, Lammers, 2013).

Внутри огромных (по площади и широтному простиранию) водосборов морей Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское реакция годового стока рек на климатические изменения, в зависимости от физико-географических условий и расположения их бассейнов, неоднозначна. С севера на юг и с запада на восток заметно меняется величина и внутригодовая структура изменений годового стока, уклон и знак линейного тренда, границы характерных периодов. Выделяется обширная зона между Енисеем и Колымой и к северу от 58-60-й параллели с.ш. с явным увеличением годового стока рек в 1976-2018 гг. – на 5-20% по сравнению с величинами 1946-1975 гг. Вторая зона с положительными изменениями охватывает российскую часть водосбора Иртыша (хотя сток самого Иртыша и Тобола, поступающий с территории Казахстана, сократился на 10-15%), отдельные районы Обского Севера, Алтая и Западных Саян.

Крупных зон с уменьшившимся стоком две. Первая (самая большая и с широким диапазоном отклонений от базового периода) охватывает южные части водосборов Оби, Енисея и Лены – к югу от 58-60-й параллели с.ш. Тем не менее, к замыкающим створам этих рек наблюдается все же увеличение стока. Оценка величины и значимости трендов среднегодовых расходов воды за 1965-2014 гг. по 108 постам в Алтай-Саянском регионе показал (Осташов и др., 2018), что для 59 из них наблюдается тенденция к увеличению стока (верховья Абакана и бассейн р. Кан), а для 49 – к уменьшению. При этом тренд оказался статистически значимым в 21 случае (Осташов и др., 2018). Вторая большая зона с отрицательными аномалиями охватывает территорию к вос-

току от р. Колымы, включая р. Пенжина и, согласно (Магрицкий, 2018), п-ов Камчатку. Здесь осадки и снежный покров уменьшились (Василевская, Стоцкунте, 2017; Nesterova et al., 2020).

Рост годового стока рек на рассматриваемой территории продолжается с середины 1990-х годов. Косвенным подтверждением этому служит количество постов с положительной аномалией стока в последние десятилетия по сравнению с периодом 1976-1995 гг. С середины 1990-х – начала 2000-х гг. число рек с положительной тенденцией выросло почти в 2 раза: до 68% постов с повышением стока до 5% в 11% случаев, на 5-20% и >20% у 49% и 40% постов соответственно. Тем не менее, реки между верхними участками Оби и Лены, правобережные притоки Нижней Оби и р. Надым, реки крайнего северо-востока АТР имели пониженный сток.

В последнее десятилетие много внимания было уделено изменению стока рек бассейна Байкала, что было связано с наблюдающимся там маловодьем. Среднегодовое значение притока речных вод в озеро Байкал за 1932-2016 гг. составила $62.5 \text{ км}^3/\text{год}$ (Алексеев и др., 2019). При этом в ее динамике не было выявлено тенденции к монотонному изменению. Анализ более продолжительного ряда годового стока (1901-2017 гг.) выявил статистически незначимый возрастающий тренд ($<0.1\%/год$), как и статистически незначимый рост среднего и изменчивости ряда годового стока 1971-2017 гг. по сравнению с 1901-1970 гг. (Синюкович, Чернышев, 2019).

Было проведено сравнение слоя стока в бассейне Байкала за 1976-2016 гг. по отношению к 1950-1975 гг. Наиболее ярко тенденция к уменьшению слоя стока характерна для бассейна Селенги. При этом для северо-запада монгольской части бассейна (р. Селенга и р. Дэлгэрмуэрэн) наблюдается рост величины стока в пределах 15%. Сток прочих крупных притоков р. Селенги на территории Монголии (р. Орхон и р. Эгийн-Гол) уменьшился на 20-40%, в результате чего водность р. Селенги на границе с РФ (с. Наушки) за 1976–2016 гг. по сравнению с 1950-1975 гг. уменьшилось на 22%. В (Zorig et al., 2019) сравнение двух периодов 1978-1995 гг. и 1996-2015 гг. показало снижение годового стока в пределах монгольской части бассейна Селенги на 7-61%, причем снижение было связано с ростом величины потенциального испарения, хотя отмечается, хоть и не статистически значимое, уменьшение слоя осадков. Менее однородная картина изменения стока на российской части водосбора. Максимальный рост годового стока (до 60 мм) зафиксирован в районе хребта Малый Хамар-Дабан, откуда получают свое питание реки Джиды и Темник. К северу от этого участка величина стока уменьшилась на 5-15%. Для северо-востока бассейна Селенги (реки Чикой, Уда, Хилок) сток уменьшился на 10-20 мм. Однако, видимо, изменение стока малых рек может сильно отличаться от этой величины. Так, сток р. Катанца увеличился на 35 мм, а сток малых рек северной части Байкала (от р. Турка и северней) вырос до 40 мм.

Оценки изменений стока в бассейне Селенги, полученные разными авторами, могут заметно отличаться. Одной из причин несовпадения является различие в исходной информации, в частности продолжительности рассма-

триваемых периодов и количества используемых постов (Алексеев и др., 2019; Синюкович, Чернышев, 2019; Frolova et al., 2017b) при расчете величины линейного тренда. Так, в двух работах, выпущенных в одном номере журнала, гипотеза о стационарности рядов годового стока для замыкающего створа р. Селенги как отвергается (Фролова и др., 2017), так и не опровергается (Синюкович, Чернышев, 2017), при разности в выборе года перелома в 5 лет. Оценка статистической значимости зависит как от выбранного уровня значимости, так и метода ее оценки. Так, для р. Селенга ряды годового, минимального и максимального стока оказываются нестационарны по критерию Стьюдента (Frolova et al., 2017b), но стационарны при использовании модифицированной версии информационного критерия Акаике (Добровольский, 2015).

Гораздо меньше работ посвящено изменению стока Амура и его притоков. Годовой объем стока р. Амур в створе г. Хабаровска составляет 261 км^3 , а в замыкающем створе порядка 369 км^3 . При этом сток Амура частично зарегулирован, в частности водохранилищами на реках Зея (1975 г.), Бурей (2003 г., 2017 г.), а также рядом водохранилищ и прудов в бассейне р. Сунгари (начиная с 1970-х гг.). Регулируемый объем водохранилищ на китайской части бассейна составляет 21.1 км^3 , а на российской 48.7 км^3 (Алексеевский, Юмина, 2018). Величина водозабора на российской части бассейна незначительна ($1.44 \text{ км}^3/\text{год}$), с небольшой долей безвозвратного водопотребления. В то же время водозабор на территории китайских провинций, частично расположенных в пределах бассейна Амура, в 2010 г. составил $62.7 \text{ км}^3/\text{год}$, причем с высокой долей водозабора на нужды сельского хозяйства – 73% (Говорушко, Горбатенко, 2013). Рост водозабора на территории Китая совпал с падением стока р. Сунгари в 1953-2000 гг. на 4-6%/10 лет (Новороцкий, 2009). При этом в 1989-2000 гг. сток Сунгари рос со скоростью 4.2%/10 лет. Сток р. Амур за два периода, 1936-1975 гг. и 1976-2015 гг., претерпел некоторые изменения. Так, сток за май-июль уменьшился на 11%, за август-октябрь на 15%, а за ноябрь-апрель вырос на 15% (Магрицкий, 2018). Также некоторая тенденция к снижению расходов демонстрируется за более длительный период (1896-2018 гг.) и за более короткий (1950-2015 гг.). Однако период с 1963 по 2018 г. уже отличается положительным, хотя и статистически незначимым трендом. Наиболее значительные положительные аномалии стока характерны для периода 1953-1964 гг., отрицательные – для 1974-1980 гг. и 2001-2008 гг. С 1974 г. наблюдается преобладание отрицательных аномалий как по количеству, так и по величине. В приустьевом створе Богородское (имеющем самый непродолжительный период наблюдений) число маловодных и многоводных лет практически одинаково (Лисина и др, 2020).

Для четырех подбассейнов в пределах бассейна Усури (Калугин, 2019), одного из крупнейших притоков Амура, был выявлен рост расходов воды за 1990-2013 гг. по сравнению с 1966-1989 гг. – от 3% до 18%. Для трех из четырех рек выявлена отрицательная тенденция изменчивости годовых расходов (уменьшение среднеквадратического отклонения на 14-23%). Река Хор показала рост изменчивости на 19%.

Статистически значимый рост среднегодовых расходов воды был зафиксирован для рек юга Приморья (Макагонова, 2009). Анализ динамики годового стока рек северной части Охотского моря (Ушаков, 2019) показал, что его величина была выше в 1987-2016 гг. по сравнению с 1958-1986 гг. на 10-27% для 10 рассмотренных в работе постов, при этом наиболее интенсивный рост наблюдается с начала 2000-х гг.

Камчатский край объединяет территории п-ова Камчатка и бассейнов рек, впадающих в Пенжинскую губу. Для рек исследуемой территории в основном характерно наличие относительно продолжительной фазы повышенного водного стока (до конца 1970-х – начала 1980-х гг.) и фазы пониженного стока в последующие. Такая тенденция была отмечена как для крупнейших рек Камчатки – р. Пенжина (Горин и др., 2015) и р. Камчатка (Фролова и др., 2014), так и более мелких водотоков (Куксина, Алексеевский, 2016). В последние 30 лет для бассейна р. Камчатка характерно некоторое увеличение стока в ее верхнем течении и незначительное уменьшение в целом для всего бассейна. Главная причина снижения годового стока рек – уменьшение сумм осадков. Это обусловлено воздействием крупномасштабных метеорологических процессов, а не местными факторами. Общая тенденция изменения водного режима состоит в выравнивании расходов воды в течение года.

Максимальный сток

Ситуация с максимальными расходами воды более разнообразная. У незарегулированных рек с доказанным повышением годового стока максимальные за год расходы воды не всегда демонстрировали такую же реакцию на климатические изменения. В (Георгиевский и др., 2019), по результатам анализа достаточно большого числа рядов за период 1950-2016 гг., увеличение максимальных расходов с середины 1980-х гг. в диапазоне от 0 до +20% обнаружено у рек между Енисеем и Колымой (т.е., главным образом, у рек с восточно-сибирским типом водного режима), а также в российской части водосбора Иртыша. Наши оценки (правда, по меньшему числу постов) не во всем с выводами из (Георгиевский и др., 2019) коррелируются. Пример – река Анабар, на которой на двух постах зафиксировано снижение максимальных расходов на 3%, тогда как в бассейне р. Яна (с Алтайским типом водного режима и высокой долей дождевого питания), который в (Георгиевский и др., 2019) обозначен территорией с отрицательной аномалией, наоборот, 3 из 5 постов демонстрируют в 1976-2017 гг. незначительный рост максимальных расходов до 4%, в сравнении с 1946-1975 гг. Причина такого разночтения, как правило, различие сравниваемых периодов. Вероятно, можно согласиться с авторами работ (Второй оценочный..., 2014; Георгиевский и др., 2019; Семенов и др., 2015), несмотря на разницу в методических подходах, что доминирующей тенденцией для рек Средней и Восточной Сибири (вплоть до правобережья Колымы) и к северу от 55-60-й параллели с.ш. служит рост годовых максимальных расходов воды.

Интересная ситуация складывается в Алтай-Саянском горном и предгорном районах. В обобщающих докладах (Второй оценочный..., 2014; Изме-

ние климата., 2011) отмечается, что с 1990-х гг. по 2010-е гг. у больших и наиболее многоводных рек Алтая, Катуня и Бии, формирование стока которых происходит в нескольких высотных зонах, отрицательный тренд максимального стока сменился на положительный, и максимальные за год расходы воды стали чаще наблюдаться во время весеннего половодья. Важнейшей причиной этого является потепление весной, вследствие чего снеготаяние охватывает одновременно несколько высотных поясов, обеспечивая большее и интенсивное поступление воды в русловую сеть. Для средних и малых рек с формированием стока в одном высотном поясе это не характерно. По сути, это модель возможной реакции рек и максимального стока в других горных районах Сибири и Дальнего Востока. Другая причина – увеличение жидких осадков весной (Изменение климата., 2011). В какой-то мере это подтверждается результатами, представленными в статье (Осташов и др., 2018): за 1965-2014 гг. лишь в 18 случаях из 112 был выявлен значимый тренд в рядах максимальных расходов половодья. В 44 случаях тренды оказались статистически значимыми. К районам с наибольшими значениями отрицательных трендов относят междуречья Чулыма и Томи, верховья Енисея (до слияния Большого и Малого Енисея). В горных и предгорных районах юга Западной Сибири статистически значимое (по t-test) нарушение однородности в многолетних рядах максимальных расходов отмечают и авторы работы (Георгиевский и др., 2019). На отдельных реках Восточной Сибири при весьма небольшом и статистически незначимом увеличении максимального стока возросла его изменчивость до значимых показателей (по F-test).

Увеличение максимальных расходов на некоторых постах сопровождалось ростом числа случаев превышения порогового расхода обеспеченностью 10%, например, на рр. Чара, Марха. Были зарегистрированы наивысшие за весь период наблюдений максимальные расходы воды (Абакан, Туба, Бия, Урсул, Ануй, Тура, Эльги, Нера, верховья Витима, Индигирки и др.). О значительном росте частоты и суммарной за год продолжительности высоких опасных наводнений в половодье на горных реках Алтая и Западных Саян (по данным за 1992-2008 гг.), на реках Южного Урала и Зауралья, в некоторых районах бассейна Енисея, за явным исключением его южной горной части, пишут авторы в отчетах (Второй оценочный..., 2014; Изменение климата., 2011).

По последним оценкам авторов статьи, все основные зарегулированные реки по-прежнему демонстрируют уменьшение максимальных расходов, достигавшее низовьев и устьев таких рек, как Енисей, Вилюй и Колыма, несмотря на значительное удаление от них гидроузлов. Максимальные расходы на замыкающих створах Оби, Енисея, Лены и Колымы уменьшились на 2, 8, 6 и 3% соответственно, в сравнении с 1946-1975 гг., и на 2, 6, 3 и 7%, в сравнении с 1936-1975 гг. Незначительное и неустойчивое повышение максимальных расходов с середины 1990-х гг. наблюдается лишь на замыкающем створе Колымы. В низовьях Енисея с середины 2000-х гг. произошло резкое снижение максимальных расходов. Максимальные расходы зарегулированного Иртыша уменьшились у г. Тобольск на 7 и 6%, на р. Вилюй, в устье, – на 5 и 7%.

В силу того, что значительная часть годового стока рек бассейна Байкала

формируется за счет дождевых паводков, картины изменения годового и максимального стока схожи.

В (Фролова и др., 2017) статистически достоверный отрицательный тренд максимальных расходов воды был выявлен у 14 из 35 постов в пределах бассейна Селенги. При этом у семи постов имеется достоверный тренд как по максимальному, так и по среднегодовому расходу. Для максимальных расходов воды все тренды отрицательные. За период с середины 1930-х гг. по 2015 г. был выявлен отрицательный тренд максимальных расходов весеннего половодья на р. Селенга (~0.5%/год), отсутствие изменений на р. Баргузин и рост на р. Верхняя Ангара (~0.5%/год) (Синюкович, Чернышев, 2017). За 1978-2015 гг. изменение максимальных расходов в пределах монгольской части бассейна было наиболее интенсивным (Zorigt et al., 2019). Уменьшение суточных максимальных расходов было выявлено для всех 12 постов, составив в среднем 62%.

Анализ изменения максимальных расходов дождевых паводков в пределах российской части бассейна Байкала за 1979-2018 гг. показал их уменьшение на 43 постах, причем для 37 постов снижение статистически значимо при уровне значимости 5% (Григорьев и др., 2020).

Для многолетней динамики максимальных расходов Амура свойственно чередование серий лет пониженной и повышенной водности (Махинов, Ким, 2020). Так, к периодам повышенной водности относятся 1896-1911, 1927-1938, 1951-1964, 1981-1998 и 2009-2019 гг. Последний период характеризуется сильными паводками в 2013 и 2019 гг. и наиболее амплитудными изменениями максимальных уровней и расходов воды. В (Махинов и др., 2020) было показано, что в 1961-2017 гг., по сравнению с 1896-1960 гг., риск формирования высоких паводков был в два раза ниже. В то же время в (Георгиевский и др., 2019) сообщается, что в бассейне Амура выросла вероятность максимальных расходов малой обеспеченности (менее 10%).

Возможные изменения многолетних норм годового и максимального стока рек России в XXI веке

Существующие подходы к оценке возможных изменений водного режима рек при прогнозируемом изменении климата включают (см., например, Hattermann et al., 2017; Kundzewicz et al., 2018): (1) оценки, полученные по результатам моделирования гидрологических процессов в моделях климата, (2) оценки на основе расчетов по гидрологическим моделям – глобальным или региональным (моделям речных бассейнов), на входе которых задаются данные расчетов моделей климата.

Ниже обобщены результаты оценки гидрологических последствий изменения климата, полученные с помощью обоих подходов.

Оценки возможных изменений стока рек России в XXI веке на основе моделей климата

Оценки на основе моделей климата возможных изменений годового стока для крупных речных бассейнов России и суммарного стока рек для крупных

регионов страны в XXI веке приводятся в работах (Георгиевский, Шалыгин, 2012; Хон, Мохов, 2012; Кислов и др., 2011), результаты которых вошли в тематический раздел Второго оценочного доклада Росгидромета (Георгиевский и др., 2014), а также в работах (Школьник и др., 2014; Добровольский, 2015; Доклад..., 2017; Shkolnik et al., 2018; Георгиевский, Голованов, 2019).

Георгиевский В.Ю. и Шалыгин А.Л. (2012) оценили возможные изменения норм годового и сезонного стока незарегулированных рек в бассейне Волги, по данным ансамбля из 9-ти глобальных моделей климата – участников проекта СМIP3. Оценивались изменения (аномалии) норм стока за период 2011-2040 гг. в сравнении с соответствующими характеристиками за 1946-1999 гг. Использовались данные расчетов при сценарии SRES-A1B эмиссии парниковых газов. Авторами констатирована большая неопределенность оценок возможных будущих изменений незарегулированного годового стока рек в бассейне Волги: межмодельный разброс рассчитанных аномалий суммарного слоя годового стока составил от -14% до +27%, при среднем значении по ансамблю порядка +3%. Отмечаются также значительные, десятки процентов, погрешности расчета среднего годового стока за исторический период в сравнении с фактическими данными по большинству моделей.

В работе (Хон, Мохов, 2012) изменения среднего годового стока 5-ти крупных рек Евразии (Волги, Оби, Енисея, Лены и Амура) в 2080-2100 годах по отношению к среднему стоку за период 1981-2000 гг. также оценивались по расчетным данным 21-й модели GCMs-СMIP3 при сценарии эмиссии парниковых газов SRES-A1B. Авторы отмечают рост усредненного по ансамблю моделей среднегодового стока Оби, Енисея и Лены к концу столетия на 15, 20 и 25% соответственно. При этом межмодельный разброс результатов оказывается значительным: для р. Обь, например, аномалии среднего годового стока меняются в диапазоне от -15% до +20%. Усредненные по ансамблю моделей изменения годового стока Волги и Амура оценены как статистически незначимые.

В работе А.В. Кислова с соавторами (2011) использовались данные расчетов 11-ти глобальных моделей климата GCMs-СMIP3 для оценки возможных изменений нормы годового стока в середине XXI века (2046-2065 гг.) в сравнении со средним стоком за период 1961-1990 гг. Оценки выполнялись для суммарного стока в пределах Восточно-Европейской равнины и Западной Сибири при наиболее жестком сценарии антропогенных воздействий SRES-A2. Авторы отмечают высокую погрешность расчета стока за исторический период, в том числе, при усреднении по ансамблю моделей. Аномалии годового стока в Западной Сибири, а также в центральной и северной частях Восточно-Европейской равнины оценены как незначимые. Вместе с тем, отрицательные аномалии нормы годового стока в южных районах Восточно-Европейской равнины могут достигать, согласно расчетам по использованным глобальным моделям климата, величин 40-60%.

Работы, опубликованные после выхода в свет Второго оценочного доклада Росгидромета (Георгиевский и др., 2014), подтверждают содержащиеся в нем выводы о незначительных положительных аномалиях нормы годового стока

для большей части территории России при умеренных сценариях антропогенного потепления в XXI веке и о высоком межмодельном разбросе рассчитанных величин стока по глобальным моделям климата.

В работе (Школьник и др., 2014) в качестве характеристики нормы годового стока на территории России использованы среднемноголетние значения разности осадков и испарения, рассчитанные по ансамблю из 26 моделей GCMs-SMIP5. Авторами оценены изменения речного стока по трем 20-летним периодам XXI века: 2011-2030; 2041-2060; 2080-2099 гг. при сценариях RCP4.5, RCP8.5 антропогенного радиационного воздействия по отношению к норме стока за период 1981-2000 гг. Рассмотрены бассейны 5-ти крупнейших рек России (Волга, Енисей, Лена, Обь и Амур), а также суммарный сток рек, впадающих в Балтийское море, рек севера (Мезень, Сев. Двина, Онега и Печора) и юга (Днепр, Дон, Днестр и Кубань) Европейской части России, а также северо-востока Сибири (Индигирка, Яна, Колыма, и Анадырь). Почти для всех рек, за исключением рек юга России, получены положительные аномалии нормы годового стока. Наибольшие положительные аномалии в конце XXI века получены при наиболее неблагоприятном сценарии RCP8.5 для Лены (34%), Енисея (27%) и суммарного стока рек северо-востока Сибири (42%). При этом для большинства бассейнов средние по ансамблю изменения стока оказались намного меньше стандартного отклонения межмодельного разброса.

Добровольский С.Г. (2015) проанализировал доступные данные расчетов по 37 глобальным моделям климата GCMs-SMIP5. Показано, что оптимальные результаты моделирования нормы годового стока разных рек дают различные климатические модели. При этом осреднение по ансамблю моделей возможных изменений среднемноголетнего стока рек позволяет снизить модельную неопределенность, хотя в целом она остается высокой.

Оценки влияния будущих климатических изменений на водную безопасность отдельных регионов России и возможности адаптации водного хозяйства к этим изменениям рассмотрены в (Доклад..., 2017). На основании оценок гидрологических характеристик, полученных с помощью 24-х глобальных моделей климата GCMs-SMIP5, показано, что в XXI веке маловероятны существенные изменения водообеспеченности на большей части территории страны, но возможно нарастание водного дефицита в бассейнах Дона и Кубани, что может потребовать планирования мер по адаптации к этим изменениям.

Оценки нормы годового стока, рассчитанные для 34-х крупных рек России по ансамблю из 24 моделей GCMs-SMIP5 для периодов 2011-2030 гг. и 2041-2060 гг. и сценариях RCP4.5, RCP8.5, приведены в работе (Георгиевский, Голованов, 2019). Показано, что на большей части России возможны положительные аномалии нормы годового стока, наиболее значительные на северо-востоке Сибири. Отрицательные аномалии возможны на юге России (бассейны рек Дон, Кубань, Терек и др.). Для большинства бассейнов межмодельный разброс существенно превышает средние аномалии по ансамблю.

Промежуточное положение между методами сценарного прогноза речного стока с помощью моделей климата, рассмотренными выше, и методами прогноза с использованием региональных гидрологических моделей, описанными

в следующем разделе, занимает исследование (Shkolnik et al., 2018), в котором представлены оценки возможных изменений максимального стока рек России в XXI веке. Авторы использовали региональную климатическую модель, разработанную в Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (Shkolnik et al., 2000) в сочетании с упрощенной глобальной гидродинамической моделью CaMa-Flood (Yamazaki et al., 2011). С помощью региональной климатической модели с разрешением 25 км рассчитывались процессы стокообразования на крупных речных водосборах, а движение воды по русловой сети и площади затопления рассчитывались по модели CaMa-Flood, имеющей близкое разрешение. Аномалии максимальных расходов оценивались для периода 2050-2059 гг. по сравнению с периодом 1990-1999 гг. для 43-х створов на крупных реках России при негативном сценарии RCP8.5 антропогенного радиационного воздействия. Показано, что наиболее значимое (до 80%) увеличение максимального стока половодья, а также рост площадей максимальных затоплений (на 3-5%), может произойти в замыкающих створах крупнейших рек Сибири. В юго-западных регионах России возможно уменьшение максимального стока в период снеготаяния на 10-30%. Положительные аномалии максимального дождевого стока могут достигать 70% в районах центральной Сибири, в то время как в западных регионах (например, в бассейне Волги) возможно уменьшение максимального дождевого стока на 10-20%. Для половины речных бассейнов рассчитанные аномалии максимального стока оценены как значимые (по отношению сигнала к шуму). В середине XXI века можно ожидать также рост повторяемости максимальных паводков для створов гидроузлов на реках Сибири и Дальнего Востока: в среднем на 20% для паводков повторяемостью от 1 раза в 2 года до 1 раза в 100 лет.

Оценки возможных изменений стока рек России в XXI веке на основе региональных гидрологических моделей

По сравнению с моделями климата, региональные гидрологические модели позволяют в большей степени учесть разнообразие механизмов формирования речного стока, характер пространственного распределения рельефа, почв, растительности, специфику имеющихся данных наблюдений, используемых для тестирования моделей, и другие особенности конкретного речного бассейна. Это дает основание считать региональные гидрологические модели более надежным инструментом оценивания будущих изменений водного режима для отдельных речных бассейнов. Вместе с тем, применение развитых физико-математических гидрологических моделей долгое время сдерживалось методической сложностью численных экспериментов с данными моделей климата, недостатком вычислительных мощностей. Поэтому определенное распространение получили оценки гидрологических последствий изменения климата в речных бассейнах России с помощью простых воднобалансовых моделей, менее требовательных к исходной информации и вычислительным ресурсам, чем физико-математические модели, и описывающих гидрологические процессы с декадным или месячным расчетным временным шагом.

В уже упоминавшейся работе (Георгиевский, Шалыгин, 2012) авторы применили воднобалансовую модель ГГИ для оценки возможных изменений водного режима незарегулированных рек бассейна Волги в XXI веке. На входе гидрологической модели задавались данные расчетов 2-х отобранных по специальной процедуре глобальных моделей климата при сценариях SRES-A2, B1. Показано, что в первой трети XXI века норма годового стока в бассейне Волги может вырасти на 5-25% по сравнению с нормой стока в период 1946-1977 гг., при этом наибольший относительный рост стока возможен в южной (степной) части бассейна.

Воднобалансовая модель Института географии РАН была применена для оценки возможных изменений речного стока в бассейнах рек Волга, Дон (Георгиади и др., 2017, Георгиади и др., 2020), Лена (Георгиади, Милюкова, 2006). Для рек Волга и Дон изменения стока оценивались по климатическим проекциям, рассчитанным по двум ансамблям моделей климата (10 и 30 моделей) при 2-х парах сценариев эмиссии парниковых газов: CMIP3 (SRES-B1 и SRES-A2) и CMIP5 (RCP2.6 и RCP8.5). Показано, что на обеих реках в первой трети XXI века возможен незначительный рост нормы естественного годового стока по сравнению с периодом 1960-1990 гг.: 2-10% для Волги и 1-5% для Дона в зависимости от рассматриваемого сценария. В сочетании с возможными сценариями будущего водопотребления в бассейнах этих рек изменение стока за рассматриваемый период XXI века может варьироваться в более широком диапазоне (Георгиади и др., 2017). Климатически обусловленные изменения нормы стока оказались существенно меньше его естественных изменений, а также изменений, обусловленных антропогенным воздействием на водосборах и в руслах рек (Георгиади и др., 2020). Для реки Лена возможные изменения стока оценивались с использованием расчетных данных по 2-м глобальным моделям климата при сценарии эмиссии парниковых газов SRES-A2 (Георгиади, Милюкова, 2006). Оценки выполнялись для периодов 2010-2039 гг. и 2040-2069 гг. Показано, что изменения нормы годового стока в рассматриваемые периоды будут незначимыми, однако возможны существенные изменения внутригодового распределения стока.

В последнее десятилетие, с развитием методов численного моделирования в гидрологии речных бассейнов, модернизацией измерительных технологий и накоплением данных об особенностях гидрологических процессов в разных природных условиях, созданием глобальных и региональных баз данных о характеристиках водосборов, ростом вычислительных ресурсов все большее распространение получают методы оценки гидрологических последствий изменения климата на основе ансамблевых экспериментов с региональными физико-математическими моделями. Перспективы использования физико-математических моделей формирования речного стока в задачах оценки климатических воздействий впервые показаны в книге (Кучмент и др., 1990). Существенным толчком в развитии этого направления стал масштабный международный эксперимент ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) в области моделирования влияния изменений климата на природные системы, инициированный Потсдамским Институтом изучения климата (PIK,

Германия). Ниже дан обзор результатов применения, в том числе, в рамках проекта ISI-MIP, физико-математических моделей гидрологического цикла, разработанных в Институте водных проблем РАН.

В работах (Гусев и др., 2014; 2016; 2019, Nasonova et al., 2018; 2019) обобщены результаты применения модели SWAP для оценок влияния изменения климата на сток рек бассейна Северного Ледовитого океана: Лена, Колыма, Индигирка, Оленек, Обь, Таз, Северная Двина.

Модель SWAP – наиболее известная отечественная модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой, широко и успешно верифицированная для решения гидрологических задач в ходе крупных международных экспериментов (Гусев, Насонова, 2010).

Расчитанные с помощью модели SWAP оценки возможных изменений стока на реках Индигирка и Оленек (Гусев и др., 2014), Лена (Гусев и др., 2016) и Обь (Гусев и др., 2019) базируются на климатических сценариях семейства SRES (A1, A2, B1, B2), усредненных, по расчетным данным ансамбля, из 16-ти моделей климата и сконструированных с помощью генератора климатических сценариев MAGICC/SCENGEN. Норма годового стока р. Индигирки, рассчитанная для всех сценариев, может монотонно расти в течение XXI века, незначительно увеличиваясь к началу 2060-х годов на 8-9%, а для р. Оленек норма стока останется практически неизменной. В среднем по бассейну Лены к середине XXI века могут вырасти осадки и суммарное испарение, при этом речной сток может уменьшиться, хотя очень незначительно. Количественные различия между полученными результатами расчетов по четырем использованным климатическим сценариям относительно невелики. Для Обь-Иртышского бассейна в целом и для отдельных его частей рассчитанные климатические изменения составляющих водного баланса относительно близки. Отрицательные аномалии нормы годового стока в Обь-Иртышском бассейне к середине XXI века для разных сценариев могут составить -11÷-17%. Пик половодья р. Оби, приходящийся на летние месяцы (июнь, июль), может заметно уменьшиться (на ~23%) и при этом сдвинуться к началу лета (на 20-25 дней).

В работе (Nasonova et al., 2018) получены оценки изменений водного режима рек Северная Двина, Колыма и Индигирка с помощью модели SWAP с использованием данных, рассчитанных по модели климата Института вычислительной математики РАН (Volodin et al., 2010) – единственной отечественной модели, участника эксперимента CMIP5. Аномалии норм годового стока для рассматриваемых речных бассейнов рассчитывались с использованием сценариев RCP4.5 и RCP8.5 для 2-х периодов: 2026-2045 гг. и 2081-2100 гг. Данные модели климата подвергались коррекции с помощью 5-ти разных процедур, что служило дополнительным источником неопределенности полученных гидрологических оценок. Усредненные по 5-ти корректирующим процедурам положительные аномалии нормы годового стока р. Северная Двина составили на конец XXI века 16% и 23% (по сравнению с периодом 1972-2003 гг.), для р. Колыма 16% и 28% (по сравнению с периодом 1978-1998 гг.), для р. Индигирка 12% и 26% (по сравнению с периодом 1972-1994 гг.) при реализа-

ции сценариев RCP4.5 и RCP8.5, соответственно. Показано, что неопределенность, обусловленная применением разных процедур коррекции климатических данных для использования их гидрологической моделью, не превышает 10%.

Данные климатических сценариев, подготовленных в рамках проекта ISI-MIP, использовались для расчетов с помощью модели SWAP возможных изменений стока рек Северная Двина, Таз и Индигирка в работе (Nasonova et al., 2019). Расчеты выполнялись по данным 5-ти моделей климата, рассчитанным при 4-х сценариях антропогенных воздействий: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5. Согласно полученным оценкам, можно ожидать роста нормы стока во всех трех рассматриваемых бассейнах в течение XXI века. Положительные аномалии нормы стока могут составить к концу века: 10% для р. Северная Двина (по сравнению с периодом 1971-2001), 10% для р. Таз (по сравнению с периодом 1971-1996 гг.) и 34% для р. Индигирка (по сравнению с периодом 1971-1994 гг.). При этом суммарная неопределенность (модельная и сценарная) полученных оценок оказалась существенно больше их средних значений.

Возможности физико-математической модели ECOMAG для оценки гидрологических последствий изменения климата исследуются в работах (Гельфан и др., 2018а,б; Gelfan et al., 2017; Морейдо, Калугин, 2017; Kalugin, 2019;) на примере бассейнов рек Лена, Амур, Селенга, Ока.

ECOMAG – физико-математическая модель формирования речного стока, разработанная в (Motovilov et al., 1999), которая в течение многих лет широко и успешно применяется для описания гидрологических процессов и воспроизведения характеристик водного режима рек на водосборах площадью от десятков до миллионов квадратных километров, расположенных в разных природных условиях (Мотовилов, Гельфан, 2018).

Оценки с помощью модели ECOMAG возможных изменений годового и максимального стока реки Лена в XXI веке рассмотрены в работах (Gelfan et al., 2017; Гельфан и др., 2018а). Данные об изменении климата в XXI веке задавались по результатам расчетов по ансамблю глобальных моделей климата GCMs-CMIP5 для 30-летних периодов 2006-2035 гг., 2036-2065 гг., 2070-2099 гг. и 4-х сценариях антропогенного радиационного воздействия (RCP2.6; RCP4.5; RCP6.0; RCP8.5). Использовались данные ансамбля из 5-ти моделей климата. Для всех периодов и всех климатических моделей получены положительные аномалии нормы годового стока реки Лены по отношению к норме стока за период 1971-2005 гг. Аномалии нормы годового стока на конец XXI века (2070-2099 гг.) для различных климатических моделей и сценариев находятся в диапазоне от 14% до 30%. Осредненные по 5 моделям – от 19.0% (для сценария RCP2.6) до 26% (для сценария RCP8.5). На основе результатов численных экспериментов оценена неопределенность рассчитанных аномалий годового стока и показано, что их среднеквадратическая погрешность растет в течение XXI века и к его концу превышает среднее значение аномалий.

Эксперименты показали возможный значимый рост максимального стока Лены в XXI веке. Для наиболее негативного климатического сценария RCP8.5

изменение величины максимального объема стока р. Лены, превышающего средний суточный расход 10%-й повторяемости, может вырасти до 70% в зависимости от климатических сценариев и временных интервалов. Усреднение по 5 климатическим моделям снижает этот рост: от 15% для начального периода до 51% для периода, завершающего XXI век.

Аналогичные эксперименты с моделью ECOMAG, но с большим ансамблем глобальных моделей климата, описаны в работе (Гельфан и др., 2018б) для р. Амур. Показано, что аномалии нормы годового стока р. Амур в XXI веке (относительно нормы базового периода 1986-2005 гг.), предвычисленные с помощью гидрологической модели по данным разных глобальных моделей климата, заметно (от $\pm 20-25\%$) отличаются при одном и том же сценарии будущих радиационных воздействий (модельная неопределенность). Уменьшение неопределенности этого вида может быть достигнуто путем усреднения по ансамблю оценок, полученных с помощью гидрологической модели для заданного сценария. Рассчитанные с помощью гидрологической модели и усредненные по ансамблю моделей климата аномалии нормы годового стока р. Амур оказались незначимыми по отношению к естественной изменчивости стока.

В работе (Морейдо, Калугин, 2017) модель ECOMAG использовалась для оценки возможных изменений водного режима р. Селенги – крупнейшего притока Байкала в XXI веке. Такая оценка стала особенно актуальной в связи с наблюдающимся в этом бассейне более чем 20-летним маловодьем, самым продолжительным за период инструментальных наблюдений. На основании данных ансамбля из 5-ти глобальных моделей климата показано, что в бассейне р. Селенги вероятен рост температуры воздуха на 1-6°C и увеличение увлажненности на 5-12% в зависимости от будущих сценариев антропогенных воздействий. Подобные возможные изменения климатических характеристик в бассейне р. Селенги в XXI веке могут привести к уменьшению водности практически на протяжении всего столетия при каждом из сценариев эмиссии парниковых газов, особенно ярко выраженной во второй половине века при сценариях RCP 6.0 и RCP 8.5, когда прогнозируемые величины снижения стока на 20-40% относительно исторического периода (1991-2005 гг.) превышают среднеквадратическую ошибку прогноза по ансамблю глобальных моделей климата.

В работе (Kalugin, 2019) на основе численных экспериментов с моделью ECOMAG и данными ансамбля моделей климата показано, что возможно статистически значимое уменьшение нормы годового стока р. Оки к концу XXI века: на 18-22% в зависимости от реализации того или иного сценария антропогенных воздействий. Автором проанализированы механизмы такого уменьшения и показано, что это может произойти, прежде всего, из-за снижения поверхностного склонового стока в весенне-летне-осенний период года и подземного стока в период весеннего снеготаяния.

Заключение

Выполненный обзор работ, опубликованных после выхода в свет Оценочных докладов Росгидромета (Второй оценочный доклад..., 2014; Доклад..., 2017) и посвященных анализу изменений водного стока рек России в условиях происходящего и прогнозируемого изменений климата, позволил сделать следующие выводы:

1. В целом для годового стока и водных ресурсов Европейской части России в последние десятилетия наблюдается тенденция к их увеличению, связанная с общим ростом увлажненности территории. Однако для большинства проанализированных водосборов изменения носят статистически незначимый характер. Относительно повышенный годовой сток характерен для восточного макросклона Русской равнины – бассейна Камы и северных рек, берущих начало со склонов Урала. Наиболее заметные изменения годового стока выражаются в его снижении и наблюдаются для рек южной (засушливой) половины Русской равнины – бассейнов Дона, Оки, Нижней Волги. Для большей части территории наибольший вклад в изменение годового стока (от 60 до 80%) вносят годовые осадки. Годовой сток рек Кавказа после начала климатических изменений в целом не претерпел существенных изменений.

2. С территории Сибири и Дальнего Востока годовой сток рек в арктические моря России увеличился на 7% в 1976-2017 гг., по сравнению с 1936-1975 гг. Выделяется обширная зона между Енисеем и Колымой и к северу от 58/60-й параллели с увеличением водных ресурсов рек на 5-10, 10-20% (и больше), по отношению к 1946-1975 гг. Вторая зона с положительными аномалиями охватывает российскую часть водосбора Иртыша (хотя сток самого Иртыша и Тобола, поступающий из Казахстана, сократился на 10-15%), отдельные районы Обского Севера, Алтая и Западных Саян. Зона с отрицательными аномалиями охватывает, во-первых, территорию к востоку от р. Колымы, включая р. Пенжину и п-ов Камчатку, обусловившую убывающую тенденцию в притоке речных вод в Чукотское море (-2,8%), во-вторых, южные части водосборов Оби, Енисея и Лены, включая бассейн р. Селенги. В отношении последней, начиная с 1970-х гг., многие авторы фиксируют уменьшение годовых расходов и их дисперсии, главным образом за счет сокращения летнего стока и расходов весеннего половодья.

3. Наиболее интенсивное уменьшение максимальных расходов воды фиксируется в бассейне Дона и Оки. Здесь с конца 1970-х годов снижение максимальных расходов воды в среднем по бассейнам составляет 46 и 37% соответственно. Одновременно с этим заметно увеличивается разброс дат их прохождения. Заметно снизились весенние максимумы и в нижнем течении Волги. На западе Русской равнины также фиксируется снижение максимумов весеннего половодья, но здесь оно носит характер тенденции. На средних и крупных реках северных и восточных районов Европейской России тенденция снижения максимумов весеннего половодья практически не выражена. Снижение максимальных расходов воды было выявлено для высокогорных водосборов в бассейне Терека (-5 - -50%), в то время как для высокогорных

водосборов бассейна Кубани заметен рост (25-50%). Предгорные водосборы в целом испытывают рост максимальных расходов.

4. Доминирующей тенденцией для рек Средней и Восточной Сибири (вплоть до правобережья Колымы) и к северу от 55-60-й параллели, а также в российской части водосбора Иртыша является рост годовых максимальных расходов воды. Наоборот, все основные зарегулированные реки демонстрируют уменьшение максимальных расходов – на 2.0, 6.6, 8.1, 4.6 и 3.1% (в сравнении с 1946-1975 гг.) соответственно на опорных постах в низовьях Оби, Иртыша, Енисея, Вилюя и Колымы. В устье Лены снижение максимальных расходов составило 5.6%. На Енисее убывающая тенденция с середины 2000-х гг. усилилась из-за наполнения Богучанского водохранилища и длительного маловодья в бассейне Селенги. В отношении последней и ее притоков, как и в целом для верховьев Енисея (до слияния Большого и Малого Енисея), междуречья Чулыма и Томи, выявлен статистически достоверный отрицательный тренд максимальных расходов воды. Подтверждается значительный и статистически значимый временной сдвиг в сторону более раннего прохождения максимальных расходов на реках с весенним половодьем. В бассейне Амура выросла вероятность максимальных расходов малой обеспеченности. В бассейне Селенги, за исключением его северо-западной части, произошло существенное снижение максимальных расходов воды, достигающее для отдельных водосборов (Орхон, Эгийн-Гол, Уда) 25-40%.

5. Подтверждены выводы, содержащиеся в тематическом разделе оценочного доклада Росгидромета (Георгиевский и др., 2014), о незначительных положительных аномалиях нормы годового стока для большей части территории России при умеренных сценариях антропогенного потепления в XXI веке. По данным ансамблевых экспериментов с моделями климата, наиболее значительные положительные аномалии нормы годового стока возможны на крупнейших реках бассейна Северного Ледовитого океана (бассейны рек Лена, Обь, Яна, Индигирка, Колыма). При реализации наиболее негативного сценария RCP8.5 антропогенного радиационного воздействия положительные аномалии стока на крупных реках Сибири могут превышать 30%. Отрицательные аномалии нормы годового стока возможны в XXI веке на реках юга ЕТР (Дон, Кубань и др.). Для большинства бассейнов полученные оценки содержат значительную неопределенность: средние по ансамблю климатических моделей оценки аномалий стока оказываются меньше стандартного отклонения межмодельного разброса полученных оценок.

6. По данным расчетов моделей климата, наибольшие положительные аномалии максимального талого и дождевого стока в XXI веке возможны на крупных реках Сибири при реализации сценария RCP8.5 антропогенного радиационного воздействия. В юго-западных регионах России возможно уменьшение максимального стока в период снеготаяния. В середине XXI века можно ожидать рост повторяемости максимальных паводков на реках Сибири и Дальнего Востока.

7. По сравнению с моделями климата, региональные гидрологические модели позволяют в большей степени учесть разнообразие механизмов форми-

рования речного стока в конкретных речных бассейнах. Это дает основание считать региональные гидрологические модели более надежным инструментом оценивания будущих изменений водного режима для отдельных речных бассейнов.

Благодарности

Первый раздел, посвященный оценке изменений многолетних норм годового и максимального стока рек России, выполнен в рамках госбюджетной темы кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Второй раздел статьи – обзор оценок возможных гидрологических последствий изменения климата – выполнен в рамках государственного задания Института водных проблем РАН (тема № 0147-2019-0001).

Список литературы

Аксянов Т.М. (2016) Применение метода русловых водных балансов для анализа надежности учета и увязки стока реки Самур. – *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, № 3, с. 4-14.

Алексеев Л.П., Георгиевский В.Ю., Аниканова М.Н., Резников С.А., Якунина О.В., Аджиев Р.А., Черногаева Г.М., Пастухов Б.В. (2019) Анализ современного состояния озера Байкал, по данным мониторинга Росгидромета. – *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 18-29.

Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. (2015) Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики. – *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, № 1, с. 14-31.

Алексеевский Н.И., Юмина Н.М. (2018) Многолетние изменения максимальных уровней воды на нижнем Амуре. – *Водные ресурсы*, т. 45, № 1, с. 3-14.

Богущая Е.М., Косицкий А.Г., Айбулатов Д.Н., Гречушникова М.Г. (2020) Средний многолетний сток рек юго-западной части Крымского полуострова. – *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, № 2, с. 37-51.

Василевская Л.Н., Сточкоте Ю.В. (2017) Анализ многолетней изменчивости атмосферных осадков и высоты снежного покрова на северо-востоке России за 1966-2014 гг. – *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*, т. 159, № 4, с. 681-699.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. (2014) – Москва, 1008 с.

Гельфан А.Н., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Лавренов А.А., Мотовилов Ю.Г. (2018а) Гидрологические последствия изменения климата в крупных речных бассейнах: опыт совместного использования региональной гидроло-

гической и глобальных климатических моделей. – *Вопросы географии*, вып. 45, с. 49-63.

Гельфан А.Н., Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. (2018б) Оценка изменений водного режима реки Амур в XXI веке при двух способах задания климатических проекций в модели формирования речного стока. – *Водные ресурсы*, т. 45, № 3, с. 223-234.

Георгиади А.Г., Милюкова И.П. (2006) Речной сток в бассейне реки Лены в условиях вероятного глобального потепления климата. – *Вычислительные технологии*, т. 11, № S6, с. 166-174.

Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. (2016) Долговременные изменения стока крупнейших сибирских рек. – *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, № 5, с. 70-81.

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А. (2017) Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона. – *Водное хозяйство России*, № 3, с. 6-23.

Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Кашутина Е.А. (2020) Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона. – *Водные ресурсы*, т. 47, № 6, с. 651-662.

Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. (2019) Оценка современных изменений максимального стока рек России. – *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 46-55.

Георгиевский В.Ю., Георгиевский М.В., Голованов О.Ф., Шалыгин А.Л. (2014) *Водные системы суши. Глава 4.1. – Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.* – М.: Росгидромет, с. 350-361.

Георгиевский, М.В., Голованов, О.Ф. (2019) Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5. – *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, т. 64, № 2, с. 206-218. Электронный ресурс. URL: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.203>.

Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. (2012) Гидрологический режим и водные ресурсы. – В кн.: *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем*, гл. 2, Росгидромет, с. 53-86.

Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. (2007) /Под ред. Н.И. Алексеевского. – М., ГЕОС, 585 с.

Говорушко С.М., Горбатенко Л.В. (2013) Трансграничное водопользование в бассейне р. Амур. – *Вестник ДВО РАН*, № 2, с. 1-10.

Горин С.Л., Коваль М.В., Сазонов А.А., Терский П.Н. (2015) Современный гидрологический режим нижнего течения реки Пенжины и первые сведения о гидрологических процессах в ее эстуарии (по результатам экспедиции 2014 г.).

– *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-Западной части Тихого океана*, № 37, с. 33-53.

Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г. (2018) Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России. – *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, № 4, с. 36-47.

Григорьев В.Ю., Миллионщикова Т.Д., Сазонов А.А., Чалов С.Р. (2020) Оценка влияния изменения климатических параметров на сток рек бассейна Байкала во второй половине XX - начале XXI вв. – *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, № 5, с. 3-11.

Гусев Е.М., Насонова О.Н. (2010) *Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой*. – М., Наука, 328 с.

Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. (2014) Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса рек Оленек и Индигирка в связи с возможным изменением климата в районе Республики Саха (Якутии). – *Водные ресурсы*, т. 41, № 6, с. 621-636.

Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. (2016) Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса в бассейне р. Лены в связи с возможным изменением климата. – *Водные ресурсы*, т. 43, № 5, с. 476-487.

Гусев Е.М., Насонова О.Н., Шурхно Е.А., Джоган Л.Я. (2019) Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса в Обь-Иртышском бассейне в связи с возможным изменением климата. – *Водные ресурсы*, т. 46, № 5, с. 463-473.

Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н. (2015) *Водная безопасность. Федеральный справочник № 29 Национальная безопасность России*, вып. 2 “Реализация стратегических национальных приоритетов, региональное и международное сотрудничество”, с. 269-275.

Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Бугров А.А., Григорьев В.Ю., Игонина М.И., Киреева М.Б., Кричевец Г.Н., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Телегина А.А., Телегина Е.А., Фатхи М.О. (2014) *Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России*. – М., ИВП РАН, 96 с.

Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Бугров А.А., Телегина А.А., Телегина Е.А. (2015). *Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование*. – М., ГЕОС, 315 с.

Дмитриева В.А, Бучик С.В. (2016) Генезис максимумов водности рек и изменчивость водного режима в современный климатический период. – *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, № 5, с. 50-57.

Добровольский С.Г. (2015) Оценка неопределенностей прогноза стока рек России и мира в XXI веке с учетом возможного антропогенного потепления. – Сб. тр. Всеросс. науч. конф. «Научное обеспечение реализации Водной стра-

тегии РФ на период до 2020 г.». – Петрозаводск, Карельский НЦ РАН, т. 1, с. 142-148.

Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. (2017) – Санкт-Петербург, 106 с.

Дурманов И.Н., Рец Е.П., Киреева М.Б. (2020) Формирование максимального стока на реках Северного Кавказа в условиях современных изменений климата. – В сб.: *Сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. – Санкт-Петербург, Изд. ООО "Издательство ВВМ", с. 250-255.*

Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад. (2011) /Под ред. А.О. Кокорина. – М., WWF России, 168 с.

Калугин А.С. (2019) Современные изменения метеорологических и гидрологических характеристик в бассейне реки Уссури. – В сб.: *Природные опасности, современные экологические риски и устойчивость экосистем: VII Дружининские чтения: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. – Хабаровск, Издательство ООО «Омега-Пресс», с. 200-205.*

Киреева М.Б., Илич В.П., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Сазонов А.А., Михайлюкова П.Г. (2017) Вклад климатических и антропогенных факторов в формирование маловодного периода в бассейне р. Дон 2007-2015 гг. – *Геориск, № 4, с. 10-21.*

Киреева М.Б., Фролова Н.Л. (2013) Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона. – *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, № 1, с. 60-76.*

Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Самсонов Т.Е., Телегина Е.А., Харламов М.А., Езерова Н.Н., Пахомова О.М. (2018) Паводочный сток на реках Европейской территории России и его роль в формировании современного водного режима. – *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, № 4, с. 48-68.*

Кислов А.В., Гребенец В.И., Евстигнеев В.М. и др. 2011. Последствия возможного потепления климата в XXI веке на севере Евразии. – *Вестник Московского университета. Серия 5. География, № 3, с. 3-8.*

Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милукова И.П. (2018) Изменение стока снегового половодья на южном макросклоне Русской равнины в период 1930-2014 гг. – *Лёд и Снег, т. 58, № 4, с. 498-506.*

Куксина Л.В., Алексеевский Н.И. (2016) Особенности пространственно-временной изменчивости водного стока рек Камчатского края. – *Водные ресурсы, т. 43, № 3. с. 254-264.*

Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. (1990) *Чувствительность гидрологических систем. – М., Наука, 143 с.*

Лавров С.А., Калюжный И.Л. (2016) Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги. – *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, № 6, с. 42-60.

Лисина И.А., Василевская Л.Н., Василевский Д.Н., Подвербная Е.Н., Агеева С.В. (2020) Анализ гидрологического режима и связей летне-осеннего стока Нижнего Амура с циркуляционными индексами. – *Географический вестник*, № 3(54), с. 98-112.

Магрицкий Д.В. (2018). Климатические обусловленные и антропогенные изменения стока воды основных рек Российской Федерации в их низовьях и морских устьях. – В сб.: *Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. – Иркутск, Издательство ИГУ, с. 285-294.

Магрицкий Д.В. (2019а) Водопотребление на водосборах арктических рек и в Арктической зоне Российской Федерации: параметры, структура, многолетняя динамика. – *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, № 3, с. 20-37.

Магрицкий Д.В. (2015) Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя. – *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, № 6, с. 85-95.

Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М., Торопов П.А., Кенжебаева А.Ж., Ермакова Г.С. (2018) Изменения стока в бассейне р. Урал. – *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, № 1, с. 90-101.

Магрицкий Д.В., Чалов С.Р., Агафонова С.А., Кузнецов М.А., Баншикова Л.С. (2019b) Гидрологический режим нижней Оби в современных гидроклиматических условиях и под влиянием крупномасштабной водохозяйственной деятельности. – *Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа*, № 1(102), с. 106-115.

Макагонова М.А. (2009) Динамика параметров водообмена малых речных бассейнов в области Восточно-Азиатского муссона. – *География и Природные Ресурсы*, № 2, с. 139-145.

Махинов А.Н., Ким В.И. (2020) Влияние изменений климата на гидрологический режим реки Амур. – *Тихоокеанская География*, № 1(1), с. 30-39.

Махинов А.Н., Косыгин В.Ю., Ахтямов М.Х., Катин В.Д. (2020) Приложение асимптотической теории вероятностей экстремальных значений к прогнозированию риска возникновения больших паводков на Нижнем Амуре. – *Водные ресурсы*, т. 47, № 3, с. 243-250.

Морейдо В.М., Калугин А.С. (2017) Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в XXI веке на основе модели формирования стока. – *Водные ресурсы*, т. 44, № 3, с. 275-284.

Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. (2018) *Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов*. – М., Изд. Российской академии наук. 300 с., doi: 10.31857/S9785907036222000001

Новороцкий П.В. (2009) Многолетние флуктуации стока р. Сунгари. – *Изв. Иркут. ун-та. Сер. Науки о Земле*, т. 1, № 1, с. 113-126.

Осташов А.А., Соловьев В.А., Пряхина Г.В. (2018) Оценка пространственно-временной изменчивости характеристик водного режима Алтае-Саянского региона. – В сб.: *Сборник материалов международной конференции «Третьи Виноградовские чтения: Грани гидрологии»* – Спб., Изд. СПбГУ, с. 618-620.

Распоряжение Правительства РФ от 25 декабря 2019 года № 3183-р. – Электронный ресурс. URL: <http://government.ru/docs/38739/>.

Российская Арктика: Пространство. Время. Ресурсы: Атлас. (2019) – ПАО «НК «Роснефть». – М., Фонд «НИР», ООО «Феория» Москва, 2019. 796 с.

Семенов В.А., Гниломедов Е.В., Салугашвили Р.С., Голубев В.Н., Фролов Д.М. (2015) География распределения и генезис климатообусловленных изменений экстремальных расходов воды, опасных наводнений и маловодий на реках России. – *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 179, с. 108-120.

Синюкович В.Н., Чернышев М.С. (2017) О трансформации расчетных характеристик годового и максимального стока главных притоков оз. Байкал. – *Водные ресурсы*, т. 43, № 3, с. 256-263.

Синюкович В.Н., Чернышев М.С. (2019) Особенности многолетней изменчивости притока поверхностных вод в озеро Байкал. – *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 30-39.

Ушаков М.В. (2019) Учет климатических изменений при проведении гидрологических расчетов на реках Примагаданья. – В сб.: *Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы: Материалы международной научно-практической конференции.* – Воронеж, Издательство: "Цифровая полиграфия", с. 516-520.

Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Зотов Л.В. (2017) Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги. – *Водные ресурсы*, т. 44, № 3, с. 243-255.

Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурье И.К. (2020) Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России. – *Геодезия и картография*, т. 81, № 7, с. 14-26.

Фролова Н.Л., Становова А.В., Горин С.Л. (2014) Режим стока воды в нижнем течении реки Камчатки и его многолетняя изменчивость. – *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*, вып. 32, с. 73-78.

Хон В.Ч., Мохов И.И. (2012) Гидрологический режим бассейнов крупнейших рек Северной Евразии в XX–XXI в. – *Водные ресурсы*, т. 39, № 1, с. 3-12.

Школьник И.М., Мелешко В.П., Кароль И.Л., Киселев А.А., Надежина Е.Д.,

Говоркова В.А., Павлова Т.В. 2014. Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке. – *Труды ГГО*, № 575, с. 65-118.

Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Rui, A.P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Giuseppe, A.T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Giovanni, C.B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Thomas, K.R., Kohnová, S., Jarkko, K.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Salinas, José L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živković, N. (2019) Changing climate both increases and decreases European river floods, *Nature*, vol. 573, no. 7772, pp. 108-111.

Frolova, N.L., Agafonova, S.A., Kireeva, M.B., Povalishnikova, E.S., Pakhomova, O.M. (2017a) Recent changes of annual flow distribution of the Volga basin rivers, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 10, no. 2, pp. 28-39.

Frolova, N.L., Belyakova, P.A., Grigoriev, V.Y., Sazonov, A.A., Zotov, L.V., Jarsjö, J. (2017b) Runoff fluctuations in the Selenga river basin, *Regional Environmental Change*, vol. 17, pp. 1-12.

Gelfan, A., Gustafsson, D., Motovilov, Yu., Arheimer, B., Kalugin, A., Krylenko, I., Lavrenov, A. (2017) Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues, *Climatic Change*, vol. 141, pp. 499-515, doi 10.1007/s10584-016-1710-5.

Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Lang, M., Llasat, M.C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blösch, G. (2014) Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, pp. 2735-2772.

Hattermann, F.F., Krysanova, V., Gosling, S.N., Dankers, R., Daggupati, P., Donnelly, C., Flörke, M., Huang, S., Motovilov, Y., Buda, S., Yang, T., Müller, C., Leng, G., Tang, Q., Portmann, F.T., Hagemann, S., Gerten, D., Wada, Y., Masaki, Y., Alemayehu, T., Satoh, Y., Samaniego, L. (2017) Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins, *Climatic Change*, vol. 141, pp. 561-576, doi: 10.1007/s10584-016-1829-4.

Jiménez Cisneros, B.E., Oki, T., Arnell, N.W., Benito, G., Cogley, J.G., Döll, P., Jiang, T., Mwakalila, S.S. (2014) Freshwater resources, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R.

Mastrandrea, L.L.White (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.

Kalugin, A.S. (2019) The impact of climate change on surface, subsurface, and groundwater flow: a case study of the Oka River (European Russia), *Water Resources*, vol. 46, Suppl. 2, pp. S31-S39, doi: 10.1134/S0097807819080104.

Kireeva, M., Frolova, N., Rets, E., Samsonov, T., Entin, A., Kharlamov, M., Telegina, E., Povalishnikova, E. (2019a) Evaluating climate and water regime transformation in the European Part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945-2015 period, *International Journal of River Basin Management*, vol. 18, no. 4, pp. 1-12.

Kireeva, M., Ilich, V., Frolova, N., Kharlamov, M., Sazonov, A., Mikhaylyukova, P. (2019b) Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low- flow period in the Don river basin during 2007-2016, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 12, no. 2, pp. 62-77.

Kundzewicz, Z.W., Graczyk, D., Maurer, T., Pińskwar, I., Radziejewski, M., Svensson, C., Szwed, M. (2005) Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 50, no. 5, pp. 797-810, doi: 10.1623/hysj.2005.50.5.797.

Kundzewicz, Z.W., Krysanova, V., Benestad, R.E., Hov, Ø., Piniewski, M., Otto, I.M. (2018) Uncertainty in climate change impacts on water resources, *Environmental Science & Policy*, vol. 79, pp. 1-8.

Magritsky, D.V., Frolova, N.L., Evstigneev, V.M., Povalishnikova, E.S., Kireeva, M.B., Pakhomova, O.M. (2018) Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, vol. 87, no. 2, pp. 177-194.

Magritsky, D.V., Frolova, N.L., Povalishnikova, E.S., Pakhomova, O.M., Kireeva, M.B. (2017) River inflow into the arctic seas of Russia and its changes, *Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting, Report series in Aerosol Science*, vol. 201, Helsinki, pp. 283-289.

Motovilov, Yu.G., Gottschalk, L., Engeland, K., Belokurov, A. (1999) *ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region*, Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series, no. 105, 88 p.

Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Volodin E.M., Kovalev E.E. (2018) Application of the land surface model SWAP and global climate model INMCM4.0 for projecting runoff of northern Russian rivers. 2. Projections and their uncertainties, *Water Resources*, vol. 45, Suppl. 2, pp. 85-92, available at: <https://doi.org/10.1134/S0097807818060271>.

Nasonova, O.N., Gusev, Ye.M., Kovalev, E.E., Ayzel, G.V., Panysheva, K.M. (2019) Projecting changes in Russian northern river runoff due to possible climate change during the XXIst century: A case study of the Northern Dvina, Taz and Indigirka rivers, *Water Resources*, vol. 46, Suppl. 1, pp. S145-S154.

Nesterova, N., Makarieva, O., Zemlyanskova, A. (2020) Hydrometeorological changes in the North-East of Russia, *E3S Web of Conferences, IV Vinogradov Conference*, 163, pp. 1-5.

Rets, E.P., Durmanov, I.N., Kireeva, M.B. (2019) Peak Runoff in the North Caucasus: Recent Trends in Magnitude, Variation and Timing, *Water Resources*, vol. 46, no. S1, pp. S56-S66.

Schneider, C., Laiz'e, C.L.R., Acreman, M.C., Flörke, M. (2013) How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, pp. 325-339.

Shiklomanov, A., Déry, S., Tretiakov, M., Yang, D., Magritsky, D., Georgiadi, A., Wenging, T. (2020) River Freshwater Flux to the Arctic Ocean, *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*, Springer, Cham., pp. 703-738.

Shiklomanov, A.I., Lammers, R.B. (2013) Changing Discharge Patterns of High-Latitude Rivers, *Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*, Academic Press Elsevier, pp. 161-175.

Shkolnik, I., Meleshko, V., Pavlova, T. (2000) Hydrodynamical limited area model for climate studies over Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, no. 4, pp. 32-49.

Shkolnik, I., Pavlova, T., Efimov, S., Zhuravlev, S. (2018) Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario, *Climate Dynamics*, vol. 50, pp. 215-230, available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3600-6>.

Troy, T.J., Sheffield, J., Wood, E.F. (2012) The role of winter precipitation and temperature on northern Eurasian stream-flow trends, *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, D05131, pp. 1-15.

Volodin, E.M., Diansky, N.A., Gusev, A.V. (2010) Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations, *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, vol. 46, no. 4, pp. 414-431.

Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H., Oki, T. (2011) A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resources Research*, vol. 47, issue 4, W04501, doi:10.1029/2010WR009726.

Zhang, X., He, J., Zhang, J., Polyakov, I., Gerdes, R., Inoue, J., Wu, P. (2013) Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend, *Nature Climate Change*, vol. 3, pp. 47-51.

Zorigt, M., Battulga, G., Sarantuya, G., Kenner, S., Soninkhishig, N., Hauck, M. (2019) Runoff dynamics of the upper Selenge basin, a major water source for Lake Baikal, under a warming climate, *Regional Environmental Change*, vol. 17, pp. 2609-2619.

References

Aksyanov, T.M. (2016) Primenenie metoda ruslovyh vodnyh balansov dlya analiza nadezhnosti ucheta i uvyazki stoka reki Samur [Application of the channel water balances method on accounting and reliability/coordination analysis for the Samur river runoff], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 3, pp. 4-14.

Alekseev, L.P., Georgievskij, V.Yu., Anikanova, M.N., Reznikov, S.A., Yakunina, O.V., Adzhiev, R.A., Chernogaeva, G.M., Pastuhov, B.V. (2019) Analiz sovremennogo sostoyaniya ozera bajkal po dannym monitoringa Rosgidrometa [Analysis of the current state of lake Baikal based on Roshydromet monitoring data], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 18-29.

Alekseevskij, N.I., Magrickij, D.V., Mihajlov, V.N. (2015) Antropogennye i estestvennye izmeneniya gidrologicheskikh ogranichenij dlya prirodopol'zovaniya v del'tah rek Rossijskoj Arktiki [Anthropogenic and natural changes of hydrological restrictions for nature use in the Russian Arctic region river deltas], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 1, pp. 14-31.

Alekseevskij, N.I., Yumina, N.M. (2018) Mnogoletnie izmeneniya maksimal'nyh urovnej vody na nizhnem Amure [Long-term variations of maximal water levels in the lower Amur], *Vodnye resursy*, vol. 45, no. 1, pp. 3-14.

Boguckaya, E.M., Kosickija, A.G., Ajbulatov, D.N., Grechushnikova, M.G. (2020) Srednij mnogoletnij stok rek yugo-zapadnoj chasti Krymskogo poluostrova [Mean annual runoff of the rivers of the Crimean peninsula southwest], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 2, pp. 37-51.

Vasilevskaya, L.N., Stochkute, Yu.V. (2017) Analiz mnogoletnej izmenchivosti atmosferyh osadkov i vysoty snezhnogo pokrova na severo-vostoke Rossii za 1966-2014 gg [Analysis of long-term variability of precipitation and snow depth in North-East Russia in 1966-2014], *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki*, vol. 159, no. 4, pp. 681-699.

Vtoroj ochenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation]. (2014) Moscow, Russia, 1008 p.

Gelfan, A.N., Kalugin, A.S., Krylenko, I.N., Lavrenov, A.A., Motovilov, Yu.G. (2018a) Hidrologicheskie posledstviya izmeneniya klimata v krupnyh rechnyh bassejnah: opyt sovместnogo ispol'zovaniya regional'noj gidrologicheskoy i global'nyh klimaticheskikh modelej [Hydrological consequences of climate change in large river basins: combined use of regional hydrological models and global climate models], *Voprosy geografii*, vol. 45, pp. 49-63.

Gelfan, A.N., Kalugin, A.S., Motovilov, Yu.G. (2018b) Ocenka izmenenij vodnogo rezhima reki Amur v XXI veke pri dvuh sposobah zadaniya klimaticheskikh proekcij v modeli formirovaniya rechnogo stoka [Assessing Amur

water regime variations in the XXI century with two methods used to specify climate projections in river runoff formation model], *Vodnye resursy*, vol. 45, no. 3, pp. 223-234.

Georgiadi, A.G., Milyukova, I.P. (2006) Rechnoj stok v bassejne reki Leny v usloviyah veroyatnogo global'nogo potepleniya klimata [River runoff within Lena river basin in conditions of probable global climate warming], *Vychislitel'nye tekhnologii*, vol. 11 (2), pp. 166-174.

Georgiadi, A.G., Kashutina, E.A. (2016) Dolgovremennye izmeneniya stoka krupnejshih sibirskih rek [Long-term runoff changes of the largest siberian rivers], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, no. 5, pp. 70-81.

Georgiadi, A.G., Koronkevich, N.I., Milyukova, I.P., Barabanova, E.A., Kashutina, E.A. (2017) Sovremennye i scenariye izmeneniya stoka Volgi i Dona [Current and scenario changes of the Volga and the Don runoff changes], *Vodnoe Khozyaistvo Rossii*, no. 3, pp. 6-23.

Georgiadi, A.G., Milyukova, I.P., Kashutina, E.A. (2020) Sovremennye i scenariye izmeneniya rechnogo stoka v bassejne Dona [Current and scenario changes of the Don runoff], *Vodnye resursy*, vol. 47, no. 6, pp. 651-662.

Georgievskij, V.Yu., Grek, E.A., Grek, E.N., Lobanova, A.G., Molchanova, T.G. (2019) Ocenka sovremennyh izmenenij maksimal'nogo stoka rek Rossii [Assessment of modern changes in maximum river flow in Russia], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 11, pp. 46-55.

Georgievskij, V.Yu., Georgievskij, M.V., Golovanov, O.F., Shalygin, A.L. (2014) Vodnye sistemy sushi. Glava 4.1. [Land water systems. Chapter 4.1], *Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii* [The Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation], Rosgidromet, Moscow, Russia, pp. 350-361.

Georgievskij, M.V., Golovanov, O.F. (2019) Prognoznye ocenki izmenenij vodnyh resursov krupnejshih rek Rossijskoj Federacii na osnove dannyh po rechnomu stoku proekta CMIP5 [Forecasting changes in river water resources of Russian Federation based on CMIP5 runoff data], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*, no. 64(2), pp. 206-218, available at: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.203>.

Georgievskij, V.Yu., Shalygin, A.L. (2012) Gidrologicheskij rezhim i vodnye resursy [Hydrological regime and water resources], *Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem, gl. 2* [Methods for assessing the consequences of climate change on physical and biological systems], Rosgidromet, Russia, pp. 53-86.

Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskogo poberezh'ya Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya. [Geoecological condition of the Arctic coast of Russia and natural resource management safety] (2007) In N.I. Alekseevskogo (ed.), *GEOS, Moscow, Russia, 585 p.*

Govorushko, S.M., Gorbatenko, L.V. (2013) Transgranichnoe vodopol'zovanie v bassejne r. Amur [Transboundary water management in the Amur river basin], *Vestnik DVO RAN*, no. 2, pp. 1-10.

Gorin, S.L., Koval', M.V., Sazonov, A.A., Terskij, P.N. (2015) Sovremennyj gidrologicheskij rezhim nizhnego techeniya reki Penzhiny i pervye svedeniya o gidrologicheskikh processah v ee estuarii (po rezul'tatam ekspedicii 2014 g.) [Modern hydrological regime of the Penzhina river downstream and first information about hydrological processes in the estuary (on results of expedition 2014)], *Issledovaniya vodnyh biologicheskikh resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoj chasti Tihogo okeana*, no. 37, pp. 33-53.

Grigoryev, V.Y., Frolova, N.L., Dzhamalov, R.G. (2018) Izmeneniye vodnogo balansa krupnykh rechnykh basseynov yevropeyskoy chasti Rossii [The water balance change of large river basins of the European Russia], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniet*, no. 4, pp. 36-47.

Grigor'ev, V.Yu., Millionshchikova, T.D., Sazonov, A.A., Chalov, S.R. (2020a) Otsenka vliyaniya izmeneniya klimaticheskikh parametrov na stok rek basseyna Baykala vo vtoroy polovine XX - nachale XXI vv [Impact of changes in the main climatic parameters on river runoff in the Baikal lake basin during the second half of the XXth and the early XXIst century], *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seria 5, Geografya*, no. 5, pp. 3-11.

Gusev, E.M., Nasonova, O.N. (2010) *Modelirovanie teplo- i vlagoobmena poverhnosti sushy s atmosferoj* [Modeling heat and moisture exchange between the Earth's surface and the atmosphere], Nauka, Moscow, Russia, 328 p.

Gusev, E.M., Nasonova, O.N., Dzhogan, L.Ya., Ajzel', G.V. (2014) Scenarnoe prognozirovanie izmeneniya sostavlyayushchih vodnogo balansa rek Olenek i Indigirka v svyazi svozmozhnym izmeneniem klimata v rajone respubliky Saha (Yakutii) [Scenario prediction of changes in water balance components of the Olenek and Indigirka rivers in the context of possible climate change in the region of the republic of Sakha (Yakutia)], *Vodnye resursy*, vol. 41, no. 6, pp. 621-636.

Gusev, E.M., Nasonova, O.N., Shurhno, E.A., Dzhogan, L.Ya. (2019) Scenarnoe prognozirovanie izmeneniya sostavlyayushchih vodnogo balansa v Ob-Irtyshskom bassejne v svyazi s vozmozhnym izmeneniem klimata [Scenario forecasting of changes in water balance components in the ob-irtysh basin in the context of possible climate change], *Vodnye resursy*, vol. 46, no. 5, pp. 463-473.

Danilov-Danil'yan, V.I., Gel'fan, A.N. (2015) Vodnaya bezopasnost' [Water safety], *Federal'nyj spravochnik № 29 Nacional'naya bezopasnost' Rossii, vyp. 2 "Realizaciya strategicheskikh nacional'nyh prioritetov, regional'noe i mezhdunarodnoe sotrudnichestvo"* [Federal Handbook No. 29 National Security of Russia, vol. 2 "Implementation of strategic national priorities, regional and international cooperation], Russia, pp. 269-275.

Dzhamalov, R.G., Frolova, N.L., Bugrov, A.A., Grigor'ev, V.Yu., Igonina, M.I., Kireeva, M.B., Krichevec, G.N., Rec, E.P., Safronova, T.I., Telegina, A.A.,

Telegina, E.A., Fathi, M.O. (2014) *Atlas vozobnovlyaemyh vodnyh resursov Evropejskoj chasti Rossii* [Atlas of renewable water resources of the European part of Russia], IVP RAN, Moscow, Russia, 96 p.

Dzhamalov, R.G., Frolova, N.L., Kireeva, M.B., Rec, E.P., Safronova, T.I., Bugrov, A.A., Telegina, A.A., Telegina, E.A. (2015) *Sovremennye resursy podzemnyh i poverhnostnyh vod Evropejskoj chasti Rossii: Formirovanie, raspredelenie, ispol'zovanie* [Present resources of ground and surface water of the European part of Russia: formation, distribution, use], GEOS, Moscow, Russia, 315 p.

Dmitrieva, V.A., Buchik, S.V. (2016) *Genezis maksimumov vodnosti rek i izmenchivost' vodnogo rezhima v sovremennyj klimaticheskij period* [Genesis of the rivers maximum water content and water regime variability in contemporary climatic period], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 5, pp. 50-57.

Dobrovol'skij, S.G. (2015) *Ocenka neopredelennostej prognoza stoka rek Rossii i mira v XXI veke s uchetom vozmozhnogo antropogennogo potepeniya* [Estimation of uncertainties in the river runoff forecast in Russia and the world in the XXIst century, considering possible anthropogenic warming], *Vseross. nauch. konf. «Nauchnoe obesechenie realizacii Vodnoj strategii RF na period do 2020 g.»* [Proc. All-Russian scientific conference "Scientific support for the implementation of the Russian Federation Water Strategy for the period up to 2020"], Karel'skij NC RAN, Petrozavodsk, Russia, vol. 1, pp. 142-148.

Doklad o klimaticheskikh riskah na territorii Rossijskoj Federacii [Report on Climate Risks in the Russian Federation] (2017) St-Peterburg, Russia, 106 p.

Durmanov, I.N., Rec, E.P., Kireeva, M.B. (2020) *Formirovanie maksimal'nogo stoka na rekah Severnogo Kavkaza v usloviyah sovremennyh izmenenij klimata* [Maximum river runoff regime in the North Caucasus under the influence of recent climate change] *Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova* [Proc. Int. Conference in memory of the outstanding Russian scientist Yuri Borisovich Vinogradov], Izd. OOO "Izdatel'stvo VVM", St-Peterburg, Russia, pp. 250-255.

Izmenenie klimata i ego vozdejstvie na ekosistemy, naselenie i hozyajstvo rossijskoj chasti Altae-Sayanskogo ekoregiona: ocenochnyj doklad [Climate change and its impact on ecosystems, population and economy of the Russian part of the Altai-Sayan ecoregion: an assessment report] (2011) in A.O. Kokorin (ed.), *WWF Rossii*, Moscow, Russia, 168 p.

Kalugin, A.S. (2019) *Sovremennye izmeneniya meteorologicheskikh i gidrologicheskikh harakteristik v bassejne reki Ussuri* [Modern variations of meteorological and hydrological characteristics in the Ussuri river basin], *Prirodnye opasnosti, sovremennye ekologicheskie riski i ustojchivost' ekosistem: VII Druzhininskie chteniya: materialy vs Rossijskoj nauchno konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proc. Natural hazards, modern environmental risks

and ecosystem sustainability: VII Druzhinin readings: materials of the All-Russian scientific conference with international participation], izdatel'stvo OOO «OmegaPress», Khabarovsk, Russia, pp. 200-205.

Kireeva, M.B., Ilich, V.P., Frolova, N.L., Harlamov, M.A., Sazonov, A.A., Mihajlyukova, P.G. (2017) *Vklad klimaticheskih i antropogennykh faktorov v formirovanie malovodnogo perioda v bassejne r. Don 2007-2015 gg* [The contribution of the climatic and anthropogenic factors to the extreme low-flow period in the Don river basin (2007-2015)], Georisk, Russia, no. 4, pp. 10-21.

Kireeva, M.B., Frolova, N.L. (2013) *Sovremennyye osobennosti vesennego polovod'ya rek bassejna Dona* [Present-day special features of the Don river basin rivers spring tide], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 1, pp. 60-76.

Kireeva, M.B., Frolova, N.L., Rec, E.P., Samsonov, T.E., Telegina, E.A., Harlamov, M.A., Ezerova, N.N., Pahomova, O.M. (2018) *Pavodochnyj stok na rekah Evropejskoj territorii Rossii i ego rol' v formirovanii sovremennogo vodnogo rezhima* [The occasional floods on the rivers of the European territory of Russia and its role in the formation of the modern water regime], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 4, pp. 48-68.

Kislov, A.V., Grebenec, V.I., Evstigneev, V.M. et al. (2011) *Posledstviya vozmozhnogo potepeniya klimata v XXI veke na severe Evrazii* [Effects of possible climate warming in the XXI st century for Northern Eurasia], *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5, Geografiya*, no. 3, pp. 3-8.

Koronkevich, N.I., Georgiadi, A.G., Dolgov, S.V., Barabanova, E.A., Kashutina, E.A., Milyukova, I.P. (2018) *Izmenenie stoka snegovogo polovod'ya na yuzhnom makrosklone Russkoj ravniny v period 1930-2014 gg* [Change in snow flood flow in the southern macro-slope of the russian plain in the period 1930-2014], *Lyod i Sneg*, vol. 58, no. 4, pp. 498-506.

Kuksina, L.V., Alekseevskij, N.I. 2016. *Osobennosti prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti vodnogo stoka rek Kamchatskogo kraja* [Space and time variations of the runoff of Kamchatka krai rivers], *Vodnye resursy*, vol. 43, no. 3, pp. 254-264.

Kuchment, L.S., Motovilov, Yu.G., Nazarov, N.A. (1990) *Chuvstvitel'nost' gidro-logicheskikh sis-tem* [Sensitivity of hydrological systems], Nauka, Moscow, Russia, 143 p.

Lavrov, S.A., Kalyuzhnyj, I.L. (2016) *Vliyanie klimaticheskih izmenenij na stok vesennego polovod'ya i faktory ego formirovaniya v bassejne Volgi* [Climatic changes impact upon the spring high-water runoff and its formation factors in the Volga basin], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 6, pp. 42-60.

Lisina, I.A., Vasilevskaya, L.N., Vasilevskij, D.N., Podverbnaya, E.N., Ageeva, S.V. (2020) *Analiz gidrologicheskogo rezhima i svyazej letne-osennego stoka Nizhnego Amura s cirkulyacionnymi indeksami* [The lower Amur river

hydrological regime and relations between the summer-autumn runoff and circulation indices], *Geograficheskij Vestnik*, no. 3(54), pp. 98-112.

Magrickij, D.V. (2018). Klimaticheskie obuslovlennyye i antropogennyye izmeneniya stoka vody osnovnykh rek Rossijskoj Federacii v ih nizov'yah i morskikh ust'yah [Climatic and anthropogenic changes in the runoff of the Russian Federation main rivers in their lower reaches and sea estuaries], *Sovremennyye tendencii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. Current Trends and Prospects for the Development of Hydrometeorology in Russia: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference], Izdatel'stvo IGU, Irkutsk, Russia, pp. 285-294.

Magrickij, D.V. (2019a). Vodopotreblenie na vodosborah arkticheskikh rek i v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federacii: parametry, struktura, mnogoletnyaya dinamika [Water consumption on the catchments of the Arctic rivers and into the Arctic zone of Russia: parameters, structure, and many-year dynamics], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 3, pp. 20-37.

Magrickij, D.V. (2015). Faktory i zakonomernosti mnogoletnih izmenenij stoka vody, vzveshennykh nanosov i teploty Nizhnej Leny i Vilyuya [Factors and trends of the long-term fluctuations of water, sediment and heat runoff in the lower reaches of the Lena river and the Vilyui river], *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5, Geografiya*, no. 6, pp. 85-95.

Magrickij, D.V., Evstigneev, V.M., Yumina, N.M., Toropov, P.A., Kenzhebaeva, A.Zh., Ermakova, G.S. (2018) Izmeneniya stoka v bassejne r. Ural [Changes of runoff in the Ural river basin], *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5, Geografiya*, no. 1, pp. 90-101.

Magrickij, D.V., Chalov, S.R., Agafonova, S.A., Kuznecov, M.A., Banshchikova, L.S. (2019b) Gidrologicheskij rezhim nizhnej Obi v sovremennykh gidroklimaticheskikh usloviyakh i pod vliyaniem krupnomasshtabnoj vodohozyajstvennoj deyatelnosti [Hydrological regime of the lower Ob in modern hydroclimatic conditions and under the influence of large-scale water management], *Nauchnyj Vestnik Yamalo-Neneckogo avtonomnogo okruga*, no. 1(102), pp. 106-115.

Makagonova, M.A. (2009) Dinamika parametrov vodoobmena mal'nykh rechnykh bassejnov v oblasti Vostochno-Aziatskogo mussona [The dynamics of water exchange parameters of small river basins in the region of the East Asian monsoon], *Geografiya i Prirodnye Resursy*, no. 2, pp. 139-145.

Mahinov, A.N., Kim, V.I. (2020) Vliyanie izmenenij klimata na gidrologicheskij rezhim reki Amur [Effect of climate changes on the hydrological regime of the Amur river], *Tihookeanskaya Geografiya*, no. 1(1), pp. 30-39.

Mahinov, A.N., Kosygin, V.Yu., Ahtyamov, M.H., Katin, V.D. (2020) Prilozhenie asimptoticheskoy teorii veroyatnostej ekstremal'nykh znachenij k prognozirovaniyu riska vozniknoveniya bol'shikh pavodkov na Nizhnem Amure

[Application of the asymptotic extreme value probability theory to forecasting the risk of high floods in the lower Amur], *Vodnye resursy*, vol. 47, no. 3, pp. 243-250.

Morejdo, V.M., Kalugin, A.S. (2017) Ocenka vozmozhnyh izmenenij vodnogo rezhima reki Selengi v XXI veke na osnove modeli formirovaniya stoka [Assessing possible changes in Selenga R. water regime in the XXI century based on a runoff formation model], *Vodnye resursy*, vol. 44, no. 3, pp. 275-284.

Motovilov, Yu.G., Gelfan, A.N. (2018) *Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh bassejnov* [Models of runoff formation in problems of watershed hydrology], Izd. Rossijskoj akademii nauk, Moscow, Russia, 300 p., doi: 10.31857/S9785907036222000001.

Novorockij, P.V. (2009) Mnogoletnie fluktuacii stoka r. Sungari [Long-term fluctuations of the Sungari runoff], *Izv. Irkut. un-ta. Ser. Nauki o Zemle*, vol. 1, no. 1, pp. 113-126.

Ostashov, A.A., Solov'ev, V.A., Pryahina, G.V. (2018) Ocenka prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti harakteristik vodnogo rezhima Altae-Sayanskogo regiona [Assessment of spatial and temporal variability of the characteristics of the water regime of the Altai-Sayan region], *Sbornik materialov mezhdunarodnoj konferencii «Tret'i Vinogradovskie chteniya: Grani gidrologii»* [Proc. Int. conference "The Third Vinogradov Readings: Hydrology Facets"], Izd. St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, pp. 618-620.

Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 25 dekabrya 2019 goda № 3183-r [Order of the Russian Federation Government of December 25, 2019] (2019) Available at: <http://government.ru/docs/38739/>.

Rossijskaya Arktika: Prostranstvo. Vremya. Resursy: Atlas [Russian Arctic: Space, Time, Resources: An Atlas] (2019) PAO «NK «Rosneft», Fond «NIR», ООО «Feoriya» Moscow, Moscow, Russia, 796 p.

Semenov, V.A., Gnilomedov, E.V., Salugashvili, R.S., Golubev, V.N., Frolov, D.M. (2015) Geografiya raspredeleniya i genezis klimatoobuslovlennyh izmenenij ekstremal'nyh raskhodov vody, opasnyh navodnenij i malovodij na rekah Rossii [Geography of distribution and genesis climate changes of extreme water flow, dangerous flooding and low water periods on rivers of Russia], *Trudy VNIIGMI-MCD*, no. 179, pp. 108-120.

Sinyukovich, V.N., Chernyshev, M.S. (2017) O transformacii raschetnyh harakteristik godovogo i maksimal'nogo stoka glavnyh pritokov oz. Bajkal [Transformation of estimated characteristics of the annual and maximal runoff in the major tributaries of lake Baikal], *Vodnye resursy*, vol. 43, no. 3, pp. 256-263.

Sinyukovich, V.N., Chernyshev, M.S. (2019) Osobennosti mnogoletnej izmenchivosti pritoka poverhnostnyh vod v ozero Bajkal [Peculiarities of long-term variability of surface water inflow to lake Baikal], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 30-39.

Ushakov, M.V. (2019) Uchet klimaticeskikh izmenenij pri provedenii gidrologicheskikh raschetov na rekah Primagadan'ya [Consideration of climatic

changes when carrying out hydrological calculations on the primagadania rivers], *Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. Int. Scientific and Practical Conference 'Global Climate Change: Regional Effects, Models, Forecasts'], Izdatel'stvo: "Cifrovaya poligrafiya", Voronezh, Russia, pp. 516-520.

Frolova, N.L., Belyakova, P.A., Grigor'ev, V.Yu., Sazonov, A.A., Zotov, L.V. (2017) Mnogoletnie kolebaniya stoka rek v bassejne Selengi [Many-year variations of river runoff in the Selenga basin], *Vodnye resursy*, vol. 44, no. 3, pp. 243-255.

Frolova, N.L., Kireeva, M.B., Harlamov, M.A., Samsonov, T.E., Entin, A.L., Lur'e, I.K. (2020) Kartografirovanie sovremennogo sostoyaniya i transformacii vodnogo rezhima rek Evropejskoj territorii Rossii [Mapping the current state and transformation of the water regime of rivers in the European territory of Russia], *Geodeziya i kartografiya*, vol. 81, no. 7, pp. 14-26.

Frolova, N.L., Stanovova, A.V., Gorin, S.L. (2014) Rezhim stoka vody v nizhnem techenii reki Kamchatki i ego mnogoletnyaya izmenchivost' [Hydrological regime of the Kamchatka river in the lower reaches and its long-term], *Issledovaniya vodnyh biologicheskikh resursov Kamchatki i severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana*, vol. 32, pp. 73-78.

Hon, V.Ch., Mohov, I.I. (2012) Gidrologicheskij rezhim bassejnov krupnejshih rek Severnoj Evrazii v XX-XXI v [The hydrological regime of large river basins in northern Eurasia in the XX-XXI centuries], *Vodnye resursy*, vol. 39, no. 1, pp. 3-12.

Shkol'nik, I.M., Meleshko, V.P., Karol', I.L., Kiselev, A.A., Nadezhina E.D., Govorkova, V.A., Pavlova, T.V. (2014) Ozhidaemye izmeneniya klimata na territorii Rossijskoj Federacii v XXI veke [Expected climate change on the territory of the Russian federation in the XXI century], *Trudy GGO*, no. 575, pp. 65-118.

Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Rui, A.P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Giuseppe, A.T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Giovanni, C.B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Thomas, K.R., Kohnová, S., Jarkko, K.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Salinas, José L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živković, N. (2019) Changing climate both increases and decreases European river floods, *Nature*, vol. 573, no. 7772, pp. 108-111.

Frolova, N.L., Agafonova, S.A., Kireeva, M.B., Povalishnikova, E.S., Pakhomova, O.M. (2017a) Recent changes of annual flow distribution of the Volga basin rivers, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 10, no. 2, pp. 28-39.

Frolova, N.L., Belyakova, P.A., Grigoriev, V.Y., Sazonov, A.A., Zotov, L.V., Jarsjö, J. (2017b) Runoff fluctuations in the Selenga river basin, *Regional Environmental Change*, vol. 17, pp. 1-12.

Gelfan, A., Gustafsson, D., Motovilov, Yu., Arheimer, B., Kalugin, A., Krylenko, I., Lavrenov, A. (2017) Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues, *Climatic Change*, vol. 141, pp. 499-515, doi 10.1007/s10584-016-1710-5.

Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Lang, M., Llasat, M.C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blösch, G. (2014) Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, pp. 2735-2772.

Hattermann, F.F., Krysanova, V., Gosling, S.N., Dankers, R., Daggupati, P., Donnelly, C., Flörke, M., Huang, S., Motovilov, Y., Buda, S., Yang, T., Müller, C., Leng, G., Tang, Q., Portmann, F.T., Hagemann, S., Gerten, D., Wada, Y., Masaki, Y., Alemayehu, T., Satoh, Y., Samaniego, L. (2017) Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins, *Climatic Change*, vol. 141, pp. 561-576, doi: 10.1007/s10584-016-1829-4.

Jiménez Cisneros, B.E., Oki, T., Arnell, N.W., Benito, G., Cogley, J.G., Döll, P., Jiang, T., Mwakalila, S.S. (2014) Freshwater resources, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.

Kalugin, A.S. (2019) The impact of climate change on surface, subsurface, and groundwater flow: a case study of the Oka River (European Russia), *Water Resources*, vol. 46, Suppl. 2, pp. S31-S39, doi: 10.1134/S0097807819080104.

Kireeva, M., Frolova, N., Rets, E., Samsonov, T., Entin, A., Kharlamov, M., Telegina, E., Povalishnikova, E. (2019a) Evaluating climate and water regime transformation in the European Part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945-2015 period, *International Journal of River Basin Management*, vol. 18, no. 4, pp. 1-12.

Kireeva, M., Ilich, V., Frolova, N., Kharlamov, M., Sazonov, A., Mikhaylyukova, P. (2019b) Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low- flow period in the Don river basin during 2007-2016, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 12, no. 2, pp. 62-77.

Kundzewicz, Z.W., Graczyk, D., Maurer, T., Pińskwar, I., Radziejewski, M., Svensson, C., Szwed, M. (2005) Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 50, no. 5, pp. 797-810, doi: 10.1623/hysj.2005.50.5.797.

Kundzewicz, Z.W., Krysanova, V., Benestad, R.E., Hov, Ø., Piniewski, M., Otto, I.M. (2018) Uncertainty in climate change impacts on water resources, *Environmental Science & Policy*, vol. 79, pp. 1-8.

Magritsky, D.V., Frolova, N.L., Evstigneev, V.M., Povalishnikova, E.S., Kireeva, M.B., Pakhomova, O.M. (2018) Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, vol. 87, no. 2, pp. 177-194.

Motovilov, Yu.G., Gottschalk, L., Engeland, K., Belokurov, A. (1999) *ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region*, Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series, no. 105, 88 p.

Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Volodin E.M., Kovalev E.E. (2018) Application of the land surface model SWAP and global climate model INMCM4.0 for projecting runoff of northern Russian rivers. 2. Projections and their uncertainties, *Water Resources*, vol. 45, Suppl. 2, pp. 85-92, available at: <https://doi.org/10.1134/S0097807818060271>.

Nasonova, O.N., Gusev, Ye.M., Kovalev, E.E., Ayzel, G.V., Panysheva, K.M. (2019) Projecting changes in Russian northern river runoff due to possible climate change during the XXIst century: A case study of the Northern Dvina, Taz and Indigirka rivers, *Water Resources*, vol. 46. Suppl. 1, pp. S145-S154.

Nesterova, N., Makarieva, O., Zemlyanskova, A. (2020) Hydrometeorological changes in the North-East of Russia, *E3S Web of Conferences, IV Vinogradov Conference*, 163, pp. 1-5.

Rets, E.P., Durmanov, I.N., Kireeva, M.B. (2019) Peak Runoff in the North Caucasus: Recent Trends in Magnitude, Variation and Timing, *Water Resources*, vol. 46, no. S1, pp. S56-S66.

Schneider, C., Laiz'e, C.L.R., Acreman, M.C., Flörke, M. (2013) How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, pp. 325-339.

Shiklomanov, A., Déry, S., Tretiakov, M., Yang, D., Magritsky, D., Georgiadi, A., Wenging, T. (2020) River Freshwater Flux to the Arctic Ocean, *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*, Springer, Cham., pp. 703-738.

Shiklomanov, A.I., Lammers, R.B. (2013) Changing Discharge Patterns of High-Latitude Rivers, *Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*, Academic Press Elsevier, pp. 161-175.

Shkolnik, I., Meleshko, V., Pavlova, T. (2000) Hydrodynamical limited area model for climate studies over Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, no. 4, pp. 32-49.

Shkolnik, I., Pavlova, T., Efimov, S., Zhuravlev, S. (2018) Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario, *Climate Dynamics*, vol. 50, pp. 215-230, available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3600-6>.

Troy, T.J., Sheffield, J., Wood, E.F. (2012) The role of winter precipitation and temperature on northern Eurasian stream-flow trends, *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, D05131, pp. 1-15.

Volodin, E.M., Diansky, N.A., Gusev, A.V. (2010) Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations, *Izv., Atmos. Ocean. Phys.*, vol. 46, no. 4, pp. 414-431.

Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H., Oki, T. (2011) A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resources Research*, vol. 47, issue 4, W04501, doi:10.1029/2010WR009726.

Zhang, X., He, J., Zhang, J., Polyakov, I., Gerdes, R., Inoue, J., Wu, P. (2013) Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend, *Nature Climate Change*, vol. 3, pp. 47-51.

Zorigt, M., Battulga, G., Sarantuya, G., Kenner, S., Soninkhishig, N., Hauck, M. (2019) Runoff dynamics of the upper Selenge basin, a major water source for Lake Baikal, under a warming climate, *Regional Environmental Change*, vol. 17, pp. 2609-2619.

Статья поступила в редакцию (Received): 16.04.2021;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 29.04.2021;

Принята к публикации (Accepted): 06.05.2021.

Для цитирования / For citation:

Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. (2021) Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 1, с. 36-79. DOI:10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.

Gelfan A., Frolova N., Magritsky D., Kireeva M., Grigoriev V., Motovilov Yu., Gusev E. (2021) Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnosis and projections.–*Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 1, pp. 36-79. DOI:10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.