

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.5.01

СОВРЕМЕННЫЕ И СЦЕНАРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЧНОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ ДОНА¹

© 2020 г. А. Г. Георгиади^а, *, И. П. Милукова^а, Е. А. Кашутина^а

^аИнститут географии РАН, Москва, 119017 Россия

*e-mail: galex50@gmail.com

Поступила в редакцию 29.05.2020 г.

После доработки 10.06.2020 г.

Принята к публикации 12.06.2020 г.

Представлены результаты исследований изменений речного стока в бассейне Дона в период инструментальных наблюдений и при сценарных условиях глобального антропогенного потепления, вероятных в первой трети текущего столетия. На основе разностно-интегральных кривых выявлены долговременные фазы повышенного/пониженного годового и сезонного стока Дона и его основных притоков за 1870–2010 гг. Продолжительность фаз варьирует от 10 лет до многих десятилетий (для стока меженных сезонов Дона). Выявленные контрастные фазы характеризуются статистически значимой разницей сезонного стока, а на большинстве рек – и годового стока, она составляет от 10 до >100%. На основе модели месячного водного баланса и среднеансамблевых модельных сценариев изменений температуры воздуха, атмосферных осадков и испарения в условиях антропогенного потепления климата, полученных в рамках программ МГЭИК/ИРСС СМIP3 и СМIP5, дана оценка возможных изменений речного стока Дона у ст. Раздорской в первой трети текущего столетия. Сценарные изменения среднего многолетнего речного стока существенно меньше его различий, характерных для долговременных фаз его повышенных/пониженных значений и его изменений, обусловленных антропогенным воздействием на водосборах и в руслах рек.

Ключевые слова: реки бассейна Дона, годовой и сезонный речной сток, долговременные фазы изменений, климатические и антропогенные факторы, модельные сценарии климатических и гидрологических изменений.

DOI: 10.31857/S0321059620060061

ВВЕДЕНИЕ

Происходящие в последние десятилетия значительные изменения климатических условий и резкая трансформация хозяйственного комплекса привели к заметным (зачастую негативным) изменениям речного стока в крупнейших речных бассейнах России. Именно поэтому все больше внимания уделяется исследованию закономерностей наблюдавшихся изменений стока и оценке его возможных изменений в среднесрочной перспективе. При этом исследования современных и сценарных изменений стока (которые исходят из гипотезы будущего антропогенного потепления) происходят практически независимо друг от друга. Это касается как методических подходов, так и полученных результатов.

В течение ряда лет авторами статьи исследуются долговременные тенденции произошедших и вероятных в будущем изменений стока в бассейнах крупных рек, обусловленных климатическими и социально-экономическими изменениями [5–8].

Исследования многолетних изменений стока основаны на концепции долговременных фаз повышенной/пониженной водности и влияния на них антропогенных факторов, исходя из которой оценивается вклад природно-климатических и антропогенных факторов в наблюдаемые изменения годового и сезонного стока. Оценки основываются на двух независимых методах. В одном методе многолетние ряды характеристик стока главной реки, измененных в результате антропогенного воздействия, восстанавливаются на основе данных о стоке рек-индикаторов (притоков и верхних частей главной реки), характеризующихся относительно слабыми антропогенными нарушениями водного режима; для этого используются регрессионные зависимости [6] и метод трансформации годового гидрографа среднесу-

¹ Статья подготовлена по материалам исследований, выполненных при поддержке РНФ (проект 20-17-00209), оценка изменений речного стока Дона в условиях антропогенного потепления климата выполнена в рамках государственного задания 0148-2019-0007/AAAA-A19-119021990093-8.

точных расходов воды [9, 12, 27]. В другом методе антропогенные изменения годового стока оцениваются на основе данных водохозяйственной статистики и воднобалансовых методов [6, 15].

Как показывают исследования, многолетние изменения годового и сезонного стока рек характеризуются периодами (фазами по принятой в отечественной гидрологии терминологии) его пониженных и повышенных величин разной продолжительности [3, 4, 6–8]. Важно, в том числе для прогностических целей, что удастся выявить долговременные контрастные фазы продолжительностью 10–15 и более лет [6, 23]. Они наблюдаются на фоне соответствующих изменений климата. Антропогенные факторы могут значительно как трансформировать сток контрастных фаз, так и изменять их временные границы.

Различным аспектам сценарных изменений речного стока в условиях глобального антропогенного потепления на территории России, в том числе в бассейне Дона, посвящено значительное число публикаций. Хотя следует отметить, что основное внимание уделяется арктическим рекам России, Волге и ряду других рек. Видимо, в какой-то мере это связано и с тем, что бассейн Дона расположен в “пограничном”, или переходном, в природно-климатическом отношении регионе (например, по характеру увлажнения), которое определяет неоднозначность изменений речного стока, обусловленных даже сравнительно небольшими изменениями климатических и антропогенных факторов.

Оценки вероятных изменений речного стока, обусловленных изменением климата, основаны или на данных о сценарных изменениях климата, полученных в результате численных экспериментов на глобальных климатических моделях общей циркуляции атмосферы и океана (КМОЦАО), или на геологических аналогах возможного изменения климата в сторону потепления, или на гипотетических сценариях. Оценки гидрологических последствий климатических изменений проводятся гидрологическими методами (в рамках которых с разной степенью детальности описываются процессы формирования речного стока) – от регрессионных, полуэмпирических зависимостей, применяемых в практике долгосрочных гидрологических прогнозов, связей годового стока с определяющими его климатическими факторами до существенно более сложных воднобалансовых моделей с декадным и месячным разрешением и физико-математических моделей.

Сценарные изменения речного стока оцениваются также по результатам расчетов, выполняемых непосредственно на глобальных климатических моделях. В этом случае средний многолетний годовой речной сток рассчитывается или как

остаточный член по разности между смоделированными средними многолетними годовыми суммами атмосферных осадков и испарения или как результат прямых расчетов стока в соответствующем блоке глобальных климатических моделей.

Применяется также ансамблевый подход к сценарным оценкам изменений стока в речных бассейнах, обусловленных не только глобальным антропогенным потеплением климата, но и трансформацией водохозяйственного комплекса, вызванной социально-экономическими изменениями в стране и их воздействием на характеристики речного стока.

Основная задача исследования состояла в сравнительном анализе наблюдаемых и сценарных изменений годового и сезонного стока рек бассейна Дона, возможных в будущем в условиях глобального потепления.

ДЛИТЕЛЬНЫЕ ПЕРИОДЫ ПОВЫШЕННОГО/ПОНИЖЕННОГО ГОДОВОГО И СЕЗОННОГО СТОКА РЕК БАССЕЙНА ДОНА В XIX–XXI вв.

*Методы анализа рядов годового и сезонного стока
и исходные данные*

Анализ долговременных фаз многолетних изменений годового и сезонного стока рек региона, обусловленных изменениями климата, основан на анализе многолетних рядов восстановленного (условно-естественного) стока (с исключенными из него в необходимых случаях заметных антропогенных изменений), на использовании разностно-интегральных кривых, критериев статистической однородности средних величин стока и на оценке характеристик выявленных фаз контрастной водности [5, 6].

Разностно-интегральные кривые представляют собой нарастающую сумму отклонений какой-либо характеристики от ее среднего многолетнего значения, рассчитанного для всего периода наблюдений. Зачастую отклонения нормируются на коэффициент вариации для сравнения временных изменений разнородных характеристик. Они позволяют выявить долговременные периоды (фазы), в течение которых намного чаще встречаются значения характеристики ниже или выше ее среднемноголетнего значения.

Границы гидрологических сезонов (половодье, меженные сезоны) определены на основе гидрографов стока, построенных за весь период наблюдений. Используются также сведения о среднемноголетних датах начала и окончания половодья и ледостава.

Граница смены долговременных фаз повышенных/пониженных величин стока определяется на основе минимальных и максимальных ко-

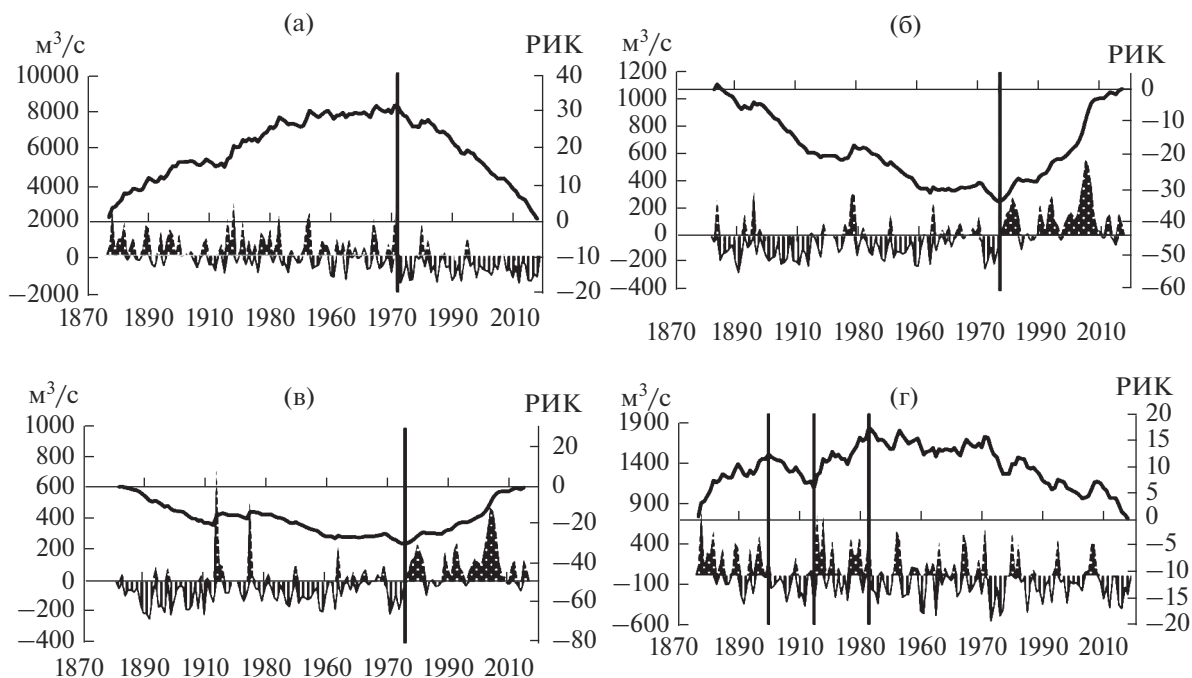


Рис. 1. Годовой и сезонный сток р. Дон у ст. Раздорской в отклонениях от среднего многолетнего значения и в координатах разностно-интегральной кривой. Вертикальные линии – границы фаз контрастной водности. а – половодье, б – летне-осенняя межень, в – зимняя межень, г – год.

ординат разностно-интегральных кривых в комбинации с использованием критерия Стьюдента.

Долговременные фазы пониженной/повышенной водности Дона у ст. Раздорской

Контрастные фазы исследовались на основе многолетних рядов условно-естественного годового и сезонного стока, который восстановлен для периода заметного антропогенного воздействия.

Временная граница смены фаз контрастной водности различается для годового стока и стока гидрологических сезонов.

Для стока половодья характерны две продолжительные фазы (рис. 1). В 1870-х гг. началась фаза повышенного стока. В 1972 г. она сменилась фазой его пониженных величин. В течение всего периода инструментальных наблюдений (1870–2017 гг.) для зимнего и летне-осеннего стока также выделяются две основные долговременные фазы. Фаза их пониженного стока приурочена к началу периода наблюдений, а фаза их повышенного стока, начавшаяся в 1970–1980 гг. (что близко к началу современного глобального потепления), продолжалась до последних лет.

Для годового стока картина смены контрастных фаз имеет более сложный характер (рис. 1). Выделяются не две, а четыре фазы. В последней четверти XIX в. длилась фаза повышенного стока,

которую сменила относительно короткая фаза пониженной водности. Затем снова наступила фаза повышенного стока, и с 1930-х гг. наблюдается длительная фаза его пониженных значений, которая еще продолжается. Отметим, что такой характер смены фаз повышенного/пониженного стока не уникален. Аналогичная ситуация наблюдается на Верхней Волге, Оке, Белой и на других реках бассейна Волги [9].

Продолжительность фаз составляет от 15 до 90–100 лет. Как правило, длительность фаз пониженной водности превышает, зачастую значительно, продолжительность фаз повышенной водности, кроме половодья, для которого характерно обратное соотношение. Разница величин среднеемноголетнего условно-естественного стока между долговременными фазами его повышенных и пониженных значений (относительно значений, характерных для фазы пониженного стока) составляет для годового стока 29, стока половодья – 70, зимнего стока – чуть более 53, летне-осеннего стока – 50%. Если выделить отдельно фазу относительно стабильного годового стока (1934–1971 гг.), средний сток которой был близок к его средней величине за весь период наблюдений, то разница между контрастными фазами будет несколько больше (35%).

Таблица 1. Основные характеристики рек бассейна Дона

Река, створ	Створ	Площадь бассейна, км ²	Природная зона	Период наблюдений, годы	Средний расход воды, м ³ /с			
					годовой	период половодья	летне-осенний	зимний
Дон—Задонск	ДЗ	31100	Лесостепь	1928–2016	125	271	75.7	77
Дон—Лиски	ДЛ	69500	Лесостепь	1895–2016	248	611	126	129
Дон—Казанская	ДК	102000	3/4 лесостепь, 1/4 степь	1891–2016	319	800	154	170
Хопер—Бесплемяновский	ХБ	44900	4/5 лесостепь, 1/5 степь	1929–2016	120	329	50	50
Медведица—Арчединский	МА	33700	Степь	1927–2016	60.4	171	24.5	21.2
Сосна—Елец	СЕ	16300	Лесостепь	1928–2016	66.4	157	35.5	38.9
Воронеж—Липецк	ВЛ	15300	Лесостепь	1932–2016	49	125	23	25
Ворона—Борисоглебск	ВБ	13200	Лесостепь	1932–2016	39.2	104	17.2	18
Битюг—Бобров	ББ	7650	Лесостепь	1933–2016	18.2	53.4	5.8	7.7
Чир—Обливская	ЧО	8540	Степь	1923–2016	10.9	31.6	4	4.2
Калитва—Погорелов	КП	10500	Степь	1933–2016	14.1	38.9	5.2	7.9

Внутрибассейновые особенности фаз повышенного/пониженного годового и сезонного стока

В качестве объектов исследования выбраны одиннадцать рек бассейна Дона (табл. 1): Дон в створах Задонск, Лиски и Казанская, а также его притоки до ст. Раздорской. Площадь бассейна Дона до этого створа составляет 377 тыс. км². Границы гидрологических сезонов (половодье, меженные сезоны) определены на основе годовых гидрографов среднемесячного стока, построенных за весь период наблюдений. Используются также сведения о среднемноголетних датах начала и окончания половодья и ледостава.

Выявлено два основных типа последовательности долговременных фаз повышенной и пониженной сезонной водности рек бассейна Дона.

Для первого типа (реки основной, стокоформирующей части водосбора Дона) для стока половодья, зимней и летне-осенней межени с самого начала наблюдений выделяются две фазы контрастной водности, смена которых произошла в 1970–1980 гг. (рис. 2). При этом для зимнего и летне-осеннего стока практически с начала периода наблюдений отмечалась фаза его пониженных значений, сменившаяся в 1970–1980-е гг. фазой повышенных значений. Для стока половодья фаза повышенной водности отмечается с начала периода наблюдений. После нее также на рубеже 1970–1980-х гг. (на Медведице — с середины 1960-х гг.) наступила фаза пониженного стока половодья. Отметим, что на р. Дон в створах Лис-

ки и Казанская, на которых имеются значительно более продолжительные ряды наблюдений (табл. 1), смена контрастных фаз сезонной водности также происходила в 1970–1980 гг.

Для второго типа многолетней динамики контрастных фаз (реки юго-западной и южной частей водосбора Дона до ст. Раздорской: Калитва у Погорелова и Чир у Обливской) для стока гидрологических сезонов характерны те же две основные долговременные фазы изменений стока. При этом смена контрастных фаз стока половодья происходила в те же годы, что и на реках первой группы. А смена долговременных фаз меженного стока (особенно зимнего) имеет существенно более сложный характер (рис. 2). Важно отметить, что на этих реках для меженного стока в 2000-е гг. намечился переход от фазы повышенной водности к фазе пониженной.

Сначала наблюдалась фаза повышенной водности, которая в 2000-е гг. сменилась на противоположную. На Дону у Задонска, на реках Вороне, Воронеже, Медведице отчетливые длительные контрастные фазы годового стока не выявляются. А на Дону у ст. Казанской и в створе Лиски, а также на реках Битюге, Сосне и Хопре последовательность смены контрастных фаз годового стока имеет сходство с последовательностью смены соответствующих фаз стока половодья.

Граница смены долговременных фаз повышенного и пониженного стока заметно варьирует для гидрологических сезонов и всего года как на одной реке, так и от одной реки к другой (табл. 2).

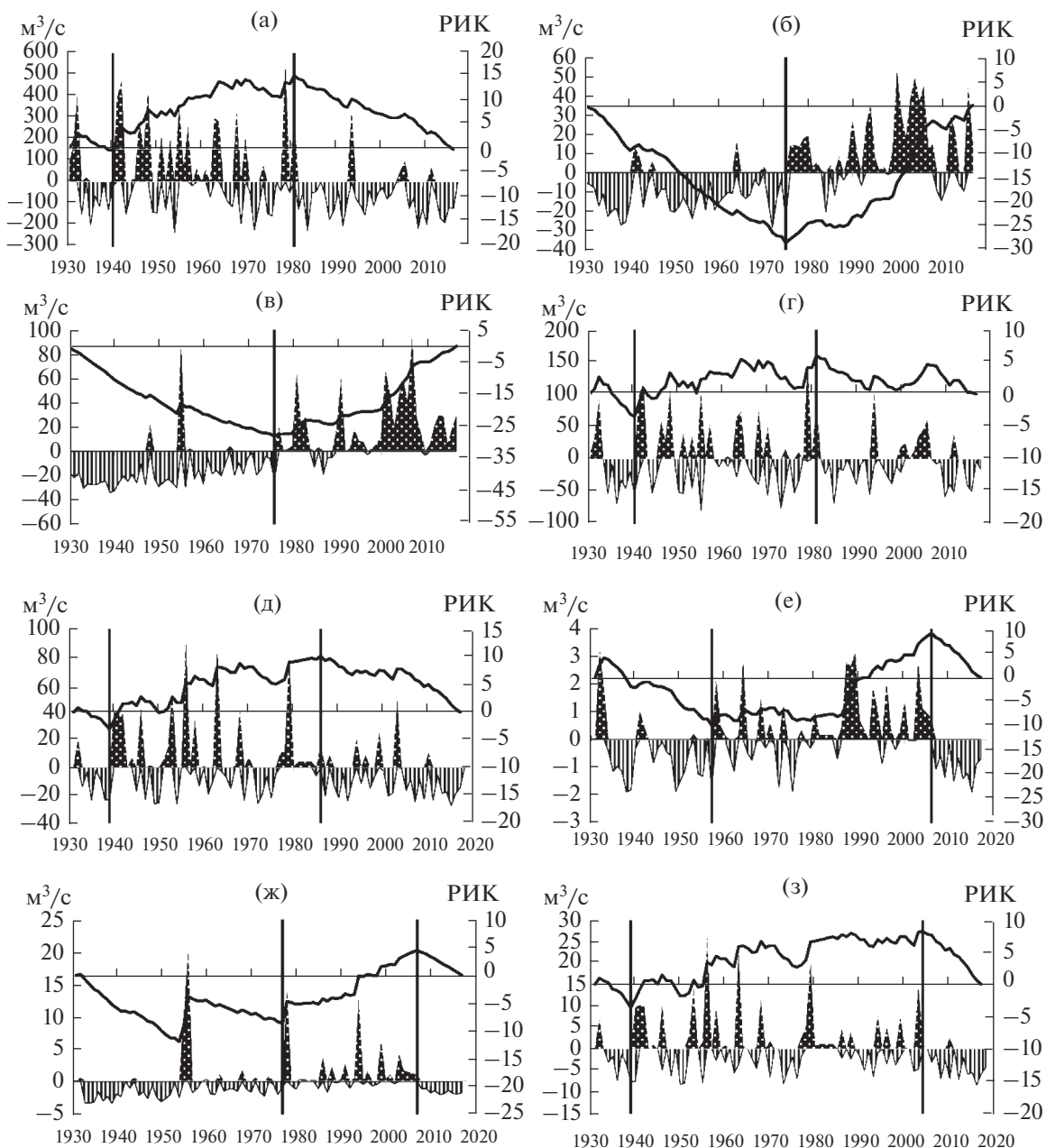


Рис. 2. Годовой и сезонный сток р. Хопер – Бесплемяновский (а – половодье, б – летне-осенняя межень, в – зимняя межень, г – год) и Чир – Обливская (д – половодье, е – летне-осенняя межень, ж – зимняя межень, з – год) в отклонениях от среднего многолетнего значения и в координатах разностно-интегральной кривой (РИК). Вертикальные линии – границы фаз контрастной водности.

Всего одна смена продолжительных контрастных фаз (в 1970–1980-е гг.) наблюдалась для стока половодья. Она приурочена к началу современного потепления (кроме Дона в створе Лиски, Медведицы в створе Арчединская, на которых аналогичная смена произошла в середине 1960-х гг.). Также всего один переход контрастных фаз характерен и для стока меженных сезонов большинства рек. Он также произошел в 1970–1980-е гг. Только для трех рек выявлено две смены кон-

трастных фаз стока меженных сезонов (для обоих меженных сезонов на Медведице в створе Арчединская, Калитве в створе Погорелов и на Чире у Обливской). Причем, на Чире для летне-осенней межени выделяется даже три таких перехода. Важно отметить, что для обоих меженных сезонов со второй половины 2000-х гг. наблюдается фаза пониженного стока на Медведице у Арчединской, Калитве у Погорелова, Чире у Обливской. Заметим, что и для годового стока в этот

Таблица 2. Годы смены контрастных фаз на реках бассейна Дона

Река, створ	Половодье	Лето—осень	Зима	Год
Дон—Задонск	1982/1983	1977/1978	1980/1981	1950/1951, 1960/1961, 1977/1978
Дон—Лиски	1964/1965	1977/1978	1978/1979	1914/1915, 1964/1965, 1977/1978, 1986/1987
Дон—Казанская	1971/1972	1977/1978	1977/1978	1914/1915, 1971/1972
Хопер—Бесплемяновский	1981/1982	1975/1976	1976/1977	1964/1965
Воронеж—Липецк	1971/1972	1979/1980	1980/1981	1951/1952, 1971/1972, 1989/1990, 2008/2009
Ворона—Борисоглебск	1981/1982	1977/1978	1976/1977	1954/1955, 1981/1982, 1997/1998, 1997/1998, 2008/2009
Медведица—Арчединский	1965/1966	1988/1989, 2008/2009	1988/1989, 2007/2008	1965/1966, 2006/2007
Битюг—Бобров	1981/1982	1976/1977	1978/1979	1981/1982
Сосна—Елец	1970/1971	1976/1977	1978/1979	1971/1972
Чир—Обливская	1986/1987	1957/1958, 1986/1987, 2006/2007	1977/1978, 2005/2006	1989/1990, 2004/2005
Калитва—Погорелов	1981/1982	1976/1977, 2012/2013	1977/1978, 2008/2009	1940/1941, 2006/2007

период выявляется фаза пониженной водности не только на Медведице у Арчединской, Калитве у Погорелова, Чире у Обливской, но и на Воронеже у Липецка и Вороне у Борисоглебска.

Продолжительность фаз также находится в широких пределах — от 10 до ~90 лет. При этом их наибольшая длительность наблюдается на Дону в створах Лиски и Казанская, период наблюдений на которых приближается к 140 годам. Для большинства рек продолжительность фаз контрастной водности не сильно различается. А на реках с более чем вековыми рядами наблюдений (Дон в створах Лиски и Казанская) для стока меженных сезонов фазы пониженной водности заметно дольше фаз их повышенной водности, а для стока половодья и годового стока характерно обратное соотношение длительности фаз.

Долговременные фазы повышенной/пониженной водности заметно различаются по среднему стоку (рис. 3). Так, для стока половодья эта разница (относительно стока в фазу его пониженных значений) меняется от 25 (на Вороне) до > 70% (на Битюге), для летне-осеннего стока — от 40 (на Сосне) до 144% (на Битюге), для зимнего стока — от 40 (на Сосне) до 150% (на Чире), а для годового стока — от 14 (на Дону в створе Лиски) до 97% (на Калитве).

Разница среднего годового стока контрастных фаз, как правило, наименьшая в сравнении с разницей стока гидрологических сезонов, кроме Чи-

ра и Калитвы, на которых она сопоставима с разницей стока контрастных фаз зимнего стока или превышает ее. На Дону, Хопре и Воронеже она становится последовательно выше в период половодья, в летне-осеннюю и зимнюю межень. А на Сосне она достигает наибольших значений в период половодья. Разница стока контрастных фаз тесно связана и с величинами среднего годового и сезонного стока (в абсолютном выражении, м³/с), и с площадью водосборов рассмотренных рек бассейна Дона. На рис. 4 приведен пример такой связи между характеристиками половодья контрастных фаз, стоком половодья и площадью водосборов рек бассейна Дона.

СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ СТОКА ДОНА У ст. РАЗДОРСКОЙ, ВОЗМОЖНЫХ В ПЕРВОЙ ТРЕТИ XXI в. В РЕЗУЛЬТАТЕ АНТРОПОГЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Вполне вероятно, что в ближайшие одно-два десятилетия в случае реализации сценариев дальнейшего антропогенного потепления могут произойти изменения характеристик речного стока, хотя это мнение разделяет не все научное сообщество. Если судить по результатам сравнения сценариев изменения средней глобальной годовой температуры воздуха [25] в рамках программ МГ-ЭИК/IPCC CMIPs (Coupled Model Intercompari-

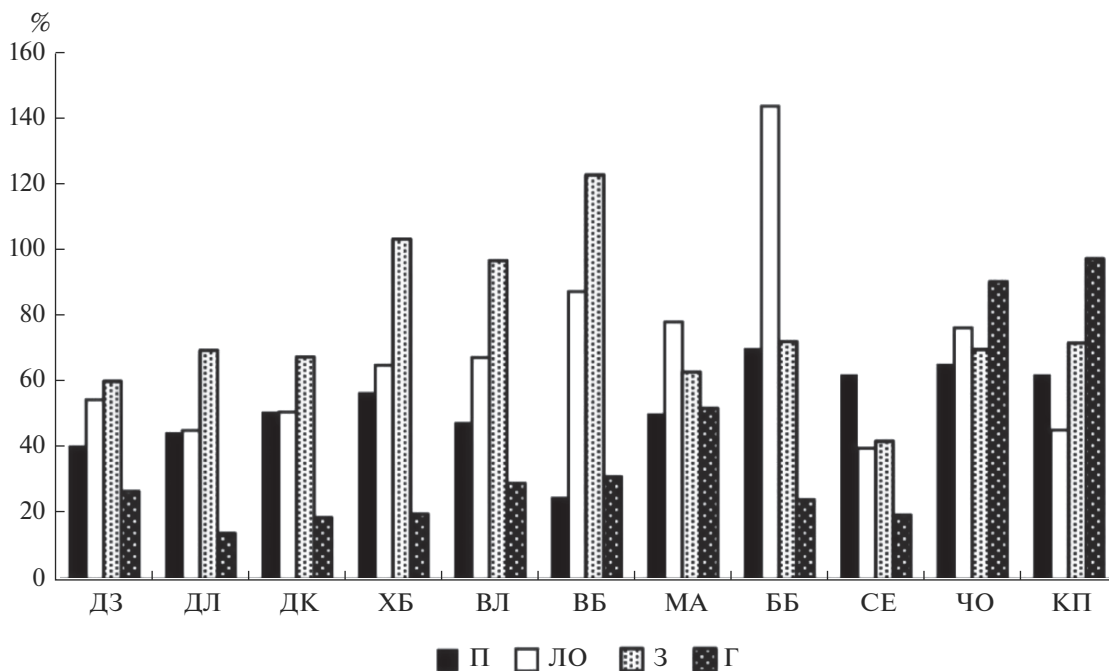


Рис. 3. Относительная разница (%) величин среднего стока контрастных фаз (относительно стока в фазу пониженного стока) для половодья (П), летне-осенней (ЛО) и зимней (З) межени, года в целом (Г) на реках бассейна Дона. Названия рек и гидрометрических створов приведены в табл. 1.

son Projects) – СМIP3 [26] и СМIP5 [21], то можно говорить об их близости в первую треть текущего столетия. Это проявляется и на региональном уровне, в том числе в бассейне Дона.

Сценарии климатических изменений в бассейне Дона

Для расчетов изменений речного стока в бассейне Дона использованы климатические сценарии, подготовленные в рамках программ СМIP3 и СМIP5. В каждой из этих программ для расчетов использованы те из четырех семейств сценариев, которые характеризуются наиболее (A2 из программы СМIP3 и RCP 8.5 из программы СМIP5) и наименее (B1 – СМIP3, RCP 2.6 – СМIP5) интенсивным ростом средней глобальной годовой температуры воздуха для периода 2010–2039 гг., который условно отнесен к 2025 г. Такой подход на основе учета наиболее широкого диапазона возможных климатических изменений обусловлен отсутствием критериев выбора какого-либо из четырех возможных семейств (групп) имеющихся климатических сценариев.

Аномалии среднемесячных средних многолетних значений температуры воздуха и сумм атмосферных осадков для указанного выше сценарного периода получены по результатам расчетов, проведенных на ансамбле из десяти КМОЦАО. Они отобраны из всего ансамбля моделей, включенных в программу СМIP3, на основе сравнения

характеристик современного модельного и наблюдаемого климата для территории Русской равнины [14].

Заметим, что для предварительного отбора климатических моделей предложены и другие подходы [1, 2, 16], в рамках которых для однородных в климатическом или гидрологическом отношении регионов (речных бассейнов) отбираются глобальные климатические модели, наилучшим образом воспроизводящие их наблюдаемые климатические характеристики. Так формируется оптимальный региональный ансамбль глобальных климатических моделей [1], который и может быть использован в дальнейшем для оценки сценарных изменений гидроклиматических характеристик.

В ряде стран Европы и Северной Америки используется иной подход. Он основан на коррекции (“bias correction”) характеристик современного модельного климата, которая строится на их сравнении с характеристиками современного климата, основанными на данных наблюдений и на распространении определенной таким образом коррекционной функции на модельные сценарии климатических изменений [24].

Расчеты сценарных изменений стока Дона проведены также по данным о сценариях, подготовленных в рамках программы СМIP5, на основе результатов расчетов, полученных на 30-ти КМОЦАО без их предварительного отбора.

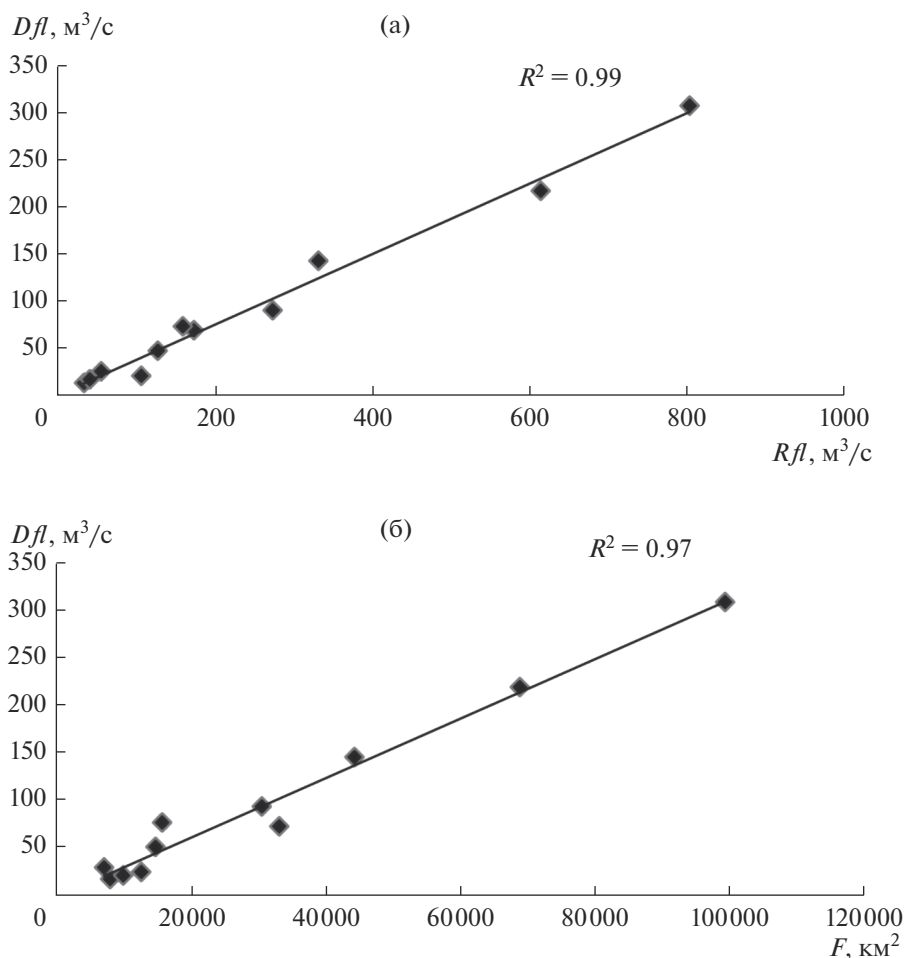


Рис. 4. Зависимость разницы среднего стока половодья контрастных фаз Dfl от его нормы Rfl (а), рассчитанной для всего периода наблюдений, и площади водосбора F (б).

Известно, что сценарии изменений, например, атмосферных осадков и температуры воздуха даже по отобраным или откорректированным климатическим моделям характеризуются их значительным разбросом. Поэтому проблема уменьшения неопределенности сценарных климатических изменений уже многие годы остается одной из главных при разработке методов оценки изменений речного стока в среднесрочной перспективе. Одно из ее решений сводится к осреднению сценарных аномалий климатических характеристик, полученных по каждой из глобальных климатических моделей, включенных в имеющиеся семейства климатических сценариев (например, А2 и В1 или RCP 2.6 и RCP 8.5). Именно такие сценарные изменения рассматриваются в статье.

В бассейне р. Дон в среднесрочных условиях первой трети XXI в., согласно обоим семействам сценариев, можно ожидать повышения среднегодовой осредненной по речному бассейну Дона температуры воздуха в пределах $1.3\text{--}2^\circ\text{C}$ (табл. 3). Расчеты сценарных изменений средне-

годовых сумм атмосферных осадков также показывают их увеличение на $2\text{--}3\%$ для сценариев В1 и А2 и на $5\text{--}7\%$ для сценариев RCP2.6 и RCP8.5 по отношению к величинам базового периода (1931–1980 гг.). При этом наибольшие их изменения могут происходить в холодную часть года [6].

Методы расчета изменений речного стока, обусловленных глобальным антропогенным потеплением

Модель месячного водного баланса Института географии РАН. В ее основе лежит уравнение среднесрочного месячного водного баланса речных водосборов для расчетных ячеек регулярной сетки, размер которых может меняться [5, 7]. Расчеты проводятся по квазисуткам, т.е. среднемесячные значения температуры воздуха и атмосферных осадков интерполируются по суткам в пределах каждого месяца на основе использования разработанных алгоритмов, которые подробно изложены в [8]. Модель прошла апробацию

Таблица 3. Изменения среднемноголетних среднегодовых значений температуры воздуха T , атмосферных осадков P_r и годового речного стока R_y в бассейне Дона (закрывающий створ ст. Раздорской) в первой трети XXI в. (2010–2039 гг.)

Параметр	Базовый период (1931–1980 гг.)	Сценарные изменения Программы МГЭИК, в дельтах от базового периода			
		СМIP3		СМIP5	
		B1	A2	RCP2.6	RCP8.5
P_r , мм	462	13	9.7	26	31
T , °C	6.3	1.5	1.3	1.8	2
R_y , мм	67*	0.5	1.4	2	3

* Условно-естественный сток.

для условий крупных речных бассейнов, расположенных в разных природных зонах России, включая зону вечномерзлых грунтов [6–8, 22].

Метод среднемноголетнего водного баланса. Оценка сценарного среднемноголетнего годового речного стока Дона у ст. Раздорской для периода 2010–2039 гг. получена на основе уравнения среднего многолетнего водного баланса и данных о сценарных среднемноголетних годовых суммах атмосферных осадков и годового испарения, полученных осреднением результатов расчетов, проведенных в рамках программы СМIP5 на 30-ти КМОЦАО для ансамблей двух контрастных групп сценариев изменения климата (RCP 8.5 и RCP 2.6). Для этого данные модельных расчетов сумм атмосферных осадков и испарения, представленные в узлах равномерной сетки 2.5° на 2.5° по широте и долготе, осреднялись для территории бассейна Дона. Аналогичным образом по данным о годовых суммах атмосферных осадков и испарения за базовый период (средним для периода 1931–1980 гг.), осредненным по 30-ти КМОЦАО, рассчитывался современный годовой сток [19]. На основе сравнения расчетных значений сценарного и современного стока оценивалось относительное его изменение в условиях потепления в первой трети XXI в.

Сценарные изменения речного стока

Результаты расчетов, полученные на основе модели месячного водного баланса и среднеансамблевых климатических сценариев СМIP3 и СМIP5, показали, что в первой трети XXI в. средний многолетний годовой сток Дона у ст. Раздорской (независимо от используемого ансамбля контрастных сценариев антропогенного потепления климата) не будет заметно отличаться от его

среднемноголетнего условно-естественного значения, рассчитанного для периода исчисления нормы стока – 1931–1980 гг. (табл. 3). Вероятное увеличение стока может быть в диапазоне от <1 до 4.5% (табл. 3), тогда как, согласно расчетам изменений стока, выполненным на модели месячного водного баланса на основе палеоклиматических реконструкций, основанных на палинологическом методе [27], – сток в период оптимума голоцена (аналога сценарных климатических условий первой трети XXI в.) был ниже современного на 3–4%. Расчеты, выполненные по палеоклиматическим реконструкциям, полученным для этой теплой геологической эпохи на ансамбле из 18-ти глобальных климатических моделей в рамках международной программы PMIP-II, показывают, что годовой сток в период оптимума голоцена не отличался от современного [10]. Международная программа сравнения результатов модельных палеореконовструкций климата – PMIP (Paleoclimate Modeling Intercomparison Project), этапы I и II, составляет часть международной программы исследования глобальных изменений в прошлом PAGES (Past Global Changes).

Результаты расчетов, проведенных на основе уравнения среднемноголетнего водного баланса и данных о сценарных среднемноголетних среднегодовых суммах атмосферных осадков и испарения, полученных осреднением результатов расчетов, проведенных на глобальных климатических моделях, включенных в программу СМIP5, также показали, что годовой сток Дона у ст. Раздорской может незначительно (на 3.5–5%) снизиться относительно нормы, рассчитанной для периода 1931–1980 гг.

Близкая к этой оценка возможного снижения среднего многолетнего стока Дона получена осреднением результатов его прямых расчетов,

выполненных на ансамбле, состоящим из 24 глобальных климатических моделей, участвующих в программе CMIP5 [13]. Согласно этим результатам, снижение среднего многолетнего годового стока, возможное в климатических условиях 2011–2030 гг. при реализации сценария RCP8.5, составило бы 5 мм (или 4% относительно стока, осредненного за период 1981–2000 гг.).

Расчеты, проведенные по воднобалансовой модели Государственного Гидрологического института [11] для среднеансамблевого климатического сценария A2 для первой трети XXI в. (2010–2039 гг.) показывают небольшое (на 6%) увеличение годового стока, а для сценария B1 – незначительное (на 4%) его снижение [23].

Отметим, что разброс оценок сценарных изменений годового стока, обусловленный заметной неопределенностью модельных климатических сценариев, весьма значителен [13]. При этом если для северных рек ЕЧР и для Волги аномалии изменения годового стока практически для каждого модельного климатического сценария, как правило, положительны, то аномалии сценарных изменений стока Дона могут быть как положительными, так и отрицательными.

Таким образом, сценарные изменения средне-многолетнего годового стока Дона у ст. Раздорской в среднесрочной перспективе (в первой трети XXI в.) в условиях антропогенного потепления могут быть весьма незначительными в сравнении с периодом исчисления его нормы – 1931–1980 гг. [19]. Масштаб этих изменений существенно меньше, чем различия между величинами годового стока долговременных фаз его пониженных/повышенных значений, характерных для более чем 100-летнего периода наблюдений. Они также значительно меньше его изменений, обусловленных антропогенными факторами.

Согласно расчетам, проведенным на модели месячного водного баланса, более значительные изменения при потеплении могут происходить с внутригодовым распределением стока [6]. Реакция внутригодовой структуры речного стока на сценарные климатические изменения проявится в “распластывании” волны половодья (для каждого из рассмотренных семейств сценариев). При этом сток половодья может быть незначительно (на 2–4%) ниже современного, а зимний и летне-осенний сток, вероятно, будет выше современного соответственно на 17–23 и 6%. И все же это существенно меньше, чем разница величин стока фаз повышенного/пониженного межлетних сезонов, характерных для последних 130 лет.

Отметим, что, согласно расчетам, проведенным по модели месячного водного баланса [10], в оптимум голоцена (если основываться на данных палеорекоконструкций климата) сток половодья мог быть заметно (на 11–12%) ниже, а в другие се-

зоны – выше современного (зимой на 19–30, летом–осенью на 6–8%). В условиях модельной реконструкции оптимума голоцена (PMIP-II) ход половодья на Дону также могло быть более выполненным, а его начало могло смещаться на более ранние сроки. При этом его объем, согласно расчетам, был немного (на 3%) ниже, а зимний и летне-осенний сток – незначительно выше современных величин – соответственно на 5 и 7%.

Таким образом, в рассмотренные теплые климатические эпохи геологического прошлого и сценарного будущего в бассейне Дона годовой сток и сток половодья, вероятно, меняется незначительно, что заметно не ухудшает ситуацию, в том числе на нижнем Дону, а сток лета–осени и, особенно существенно, зимы может увеличиться, что будет способствовать улучшению экологической ситуации в среднесрочной перспективе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долговременные фазы повышенного/пониженного годового и сезонного стока Дона и его основных притоков, выявленные для периода инструментальных наблюдений на основе разностно-интегральных кривых, – одна из основных особенностей его многолетних изменений. Приведенные результаты подтверждают полученный ранее вывод о том, что долговременные контрастные фазы характерны для многолетних изменений стока не только крупных, но также средних и небольших рек. Продолжительность таких фаз варьирует от 10 лет до многих десятилетий. Выявленные контрастные фазы характеризуются статистически значимой разницей сезонного стока, а на основных реках бассейна Дона – разницей и годового стока, которая составляет от 10 до >100%. Выявленные долговременные контрастные фазы водности рек могут быть использованы в гидрологических расчетах как основа для получившего развитие байесовского подхода к учету нестационарности его многолетних изменений.

На основе модели месячного водного баланса и среднеансамблевых модельных сценариев изменений температуры воздуха, атмосферных осадков и испарения в условиях антропогенного потепления климата, полученных в рамках программ МГЭИК/ИРСС CMIP3 и CMIP5, дана оценка возможных изменений речного стока Дона у ст. Раздорской в первой трети XXI в. В рассмотренных теплых климатических эпохах не только сценарного будущего, но и геологического прошлого (в период оптимума голоцена) средне-многолетний годовой сток и сток половодья Дона, вероятно, могут незначительно отличаться от их современных величин, тогда как сток межлетних сезонов может заметно увеличиться (особенно зимой). Изменения речного стока в сценарных условиях существенно меньше различий между

стоком, наблюдавшимся в период инструментальных наблюдений в течение долговременных фаз его повышенных/пониженных значений, и изменений, обусловленных антропогенным воздействием. Видимо, возможные в среднесрочной перспективе изменения годового стока Дона заметно не ухудшат ситуацию, в том числе в его нижнем течении, а изменения его внутригодового распределения, которое может проявиться в увеличении межлетнего стока, в известной степени будет способствовать улучшению экологического состояния реки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу // Лед и Снег. 2013. 53(1). С. 83–92.
2. Бабина Е.Д., Георгиади А.Г. Оценка качества воспроизведения температуры воздуха и сумм атмосферных осадков в бассейне р. Лена глобальными климатическими моделями // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2016. № 5. С. 69–76.
3. Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. Вып. 145. Гидрологические изменения. 2018. С. 206–218.
4. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
5. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милокова И.П. О вкладе климатических и антропогенных факторов в изменения стока крупных рек Русской равнины и Сибири // ДАН. 2019. Т. 488. № 5. С. 539–544.
6. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милокова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Макс Пресс, 2014. 214 с.
7. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милокова И.П., Кислов А.В., Анисимов О.А., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Бородин О.О. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.
8. Георгиади А.Г., Милокова И.П. Масштабы гидрологических изменений в бассейне реки Волги при антропогенном потеплении климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 72–79.
9. Георгиади А.Г., Милокова И.П., Бородин О.О. Особенности многолетних изменений водности рек в бассейне Волги в XIX–XXI веках // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Всерос. науч. конф. с международ. участием. Сб. науч. тр. М.: Студия Ф1, 2019. С. 102–105.
10. Георгиади А.Г., Милокова И.П., Кашутина Е.А. Гидрологические изменения в регионах Русской равнины в теплые эпохи геологического прошлого и сценарного будущего // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 5. С. 70–80.
11. Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л. и др. Оценка влияния возможных климатических изменений на гидрологический режим и водные ресурсы рек бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 89–99.
12. Георгиевский В.Ю., Моисеенков А.И. Восстановление естественных гидрографов стока крупных рек, зарегулированных каскадом водохранилищ (на примере р. Волги) // Тр. ГГИ. 1984. Вып. 291. С. 54–61.
13. Георгиевский М.В., Голованов О.Ф. Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5 // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. Вып. 2. С. 206–218.
14. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс Пресс, 2008. 290 с.
15. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Зайцева И.С., Кашутина Е.А., Мельник К.С. Гидрология антропогенного направления: становление, методы, результаты // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 2. С. 8–23.
16. Менжулин Г.В., Шамируин В.И., Савватеев С.П. К оценке точности модельных сценариев изменений климата, рекомендованных комиссией IPCC для расчетов последствий глобального потепления // Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии. СПб.: Наука, 2005. С. 55–85.
17. Методология долгосрочного сценарного прогнозирования изменений ресурсов стока в крупных речных бассейнах России в условиях глобального потепления климата и трансформации водохозяйственного комплекса. Проект РФФИ_ОФИ 07-05-12085-офи. https://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_307329
18. Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен–голоцен. М.: ГЕОС, 2009. 120 с.
19. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Водный кадастр Российской Федерации. Ежегодное издание. 2015 год. СПб.: Эс Пэ Ха, 2016. 163 с.
20. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // Материалы Британско-Рос. Конф. “Гидрологические последствия изменений климата” Новосибирск, 2007. С. 143–151.
21. CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 – Overview. <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>
22. Georgiadi A., Milyukova I., Kashutina E. Response of River Runoff in the Cryolithic Zone of Eastern Siberia (Lena River Basin) to Future Climate Warming // Environ. Change in Siberia. Advances in Global Change Research. London, N.Y.: Dordrecht Heidelberg, 2010. 40. P. 157–169.
23. Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers // Polarforschung. 2018. V. 87 (2). P. 167–176.

24. *Haerter O.J., Hagemann S., Moseley C., Piani C.* Climate model bias correction and the role of timescales // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 1065–1079.
25. *Knutti R., Sedláček J.* Robustness and Uncertainties in the New CMIP5 Climate Model Projections // *Nature Climate Change*. 2012. V. 3(4). <https://doi.org/10.1038/nclimate1716>
26. *Meehl G.A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., Taylor K.E.* The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2007. V. 8. P. 1383–1394.
27. *Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.R., Polischuk Yu. et al.* Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections // *Regional Environ. Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Chapter 4. Springer Sci. + Business Media Dordrecht / Eds P.Ya. Groisman, G. Gutman. 2013. P. 111–154.