

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЙ НЕДОСТАТОЧНОГО
УВЛАЖНЕНИЯ, ВЛИЯЮЩИХ НА МАЛОВОДНОСТЬ В БАСЕЙНАХ
КРУПНЫХ РЕК ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ¹

© 2021 г. Е. А. Черенкова^{a, b, *}, М. В. Сидорова^a

^aИнститут географии РАН, Москва, 119017 Россия

^bИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Москва, 119017 Россия

*e-mail: cherenkova@igras.ru

Поступила в редакцию 08.11.2019 г.

После доработки 14.05.2020 г.

Принята к публикации 16.10.2020 г.

С помощью стандартизованного индекса атмосферных осадков и эвапотранспирации SPEI исследуются региональные особенности изменений характеристик годового атмосферного увлажнения на территории Европейской части России. Установлено, что годы с существенным недостатком увлажнения в бассейнах рек Северная Двина, Печора и Дон в период 1991–2018 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. стали повторяться реже, а в бассейне Волги – чаще. Исследование показало тесную связь между стоком крупных рек Европейской части России и годовым увлажнением в их бассейне. Для маловодных лет Волги и Дона в основном характерен дефицит увлажнения в бассейнах либо в текущем году, либо в течение двух лет подряд, в то время как сток северных рек реагирует на недостаточное увлажнение в том же году. Важно отметить статистически значимое увеличение в 3.7 раза повторяемости пар следующих друг за другом засушливых лет в бассейне Волги в современный период. При этом недостаток увлажнения в ее бассейне в 1.6 раза повышает вероятность маловодности реки в следующем году. Показано, что сток в годы недостаточного увлажнения понижался по сравнению с нормой в среднем на 4.4% для Волги, на 8% для Дона, на 8.7% для Печоры и на 10.9% для Северной Двины.

Ключевые слова: маловодность, годовое увлажнение территории, изменение климата, речной бассейн, стандартизованный индекс осадков и эвапотранспирации, Европейская часть России.

DOI: 10.31857/S0321059621030068

ВВЕДЕНИЕ

Значение увлажнения бассейнов крупных рек Европейской части России (ЕЧР) трудно переоценить по причине того, что это основные источники водных ресурсов для наиболее густонаселенной и экономически освоенной части России, а также в связи со значимостью вклада их речного стока в Северный Ледовитый океан и с существенным влиянием на уровень Каспийского моря. Наблюдаемое потепление приводит к изменениям компонентов гидрологического цикла [54, 56], прежде всего его главной составляющей – атмосферных осадков. Многие исследователи констатируют, что интенсивность осадков, как и

влажность атмосферы, возрастает при потеплении климата [27, 42]. Изменения атмосферной циркуляции в умеренных широтах, оказывающие существенное влияние на формирование регионального климата, происходили на фоне наблюдаемого в 1979–2003 гг. расширения к полюсам ячейки Гадлея [55] – в среднем 1° широты / 10 лет с одновременным уменьшением ее интенсивности [59]. Вместе с тем для современного потепления характерно уменьшение градиента температуры между полюсом и экватором, ослабление региональной зональной циркуляции, увеличение повторяемости событий атмосферного блокирования на полушарии [26, 43, 64]. На фоне связанного с глобальным потеплением наблюдаемого роста количества осадков над сушей в средних широтах, наиболее существенного в течение последних десятилетий [48, 51, 57], отмечается увеличение повторяемости и интенсивности засух летом как в Европе [45], так и на юге ЕЧР [17].

¹ Анализ связи стока рек Европейской части России с условиями недостаточного увлажнения в бассейнах (проект 19-17-00242) и исследование повторяемости засушливых лет на Европейском Севере России (проект 17-77-20123) выполнены при финансовой поддержке РНФ; в остальных регионах Европейской части России изменения увлажнения изучались в рамках научной темы 0148-2019-0009.

О разнонаправленности изменений речного стока на территории РФ в XX–начале XXI вв. свидетельствуют результаты многих исследований [6, 16, 46]. В работах [5, 40] отмечено увеличение стока рек для большей части территории России в последние десятилетия. Такие изменения затронули в основном северную часть страны, тогда как в южной части наблюдалось уменьшение стока. Так, обнаружено, что увеличение годового стока воды в современный период по сравнению с 1936–1975 гг. составило от 4 до 18% для большинства арктических рек России [32]. Для бассейнов Дона и Днепра было характерно снижение годового стока и более частое наблюдение маловодных лет. Маловодье в бассейне Дона в период 2007–2015 гг. – рекордное по продолжительности и охвату притоков [20]. Отмечено, что при общем снижении стока происходила значительная перестройка стока в течение года. За счет увеличения количества зимних оттепелей в последние десятилетия [23] снег не столь активно накапливался зимой, постепенно срабатываясь в зимнюю межень, что приводило к пополнению запасов подземных вод [1–3, 5, 6, 8–10, 20]. В результате сток половодья значительно снизился, а сток меженных периодов, наоборот, существенно (на 30–40%) возрос [9]. Другой особенностью было увеличение межгодовой изменчивости стока, особенно сезонного. В работе [5] показано, что на фоне общей тенденции к повышению стока рек возможны как аномально многоводные, так и аномально маловодные годы и сезоны.

Атмосферные осадки – основная приходная составляющая стока, поэтому аномально низкое их количество может рассматриваться в качестве важного фактора лет повышенной и пониженной водности. Результаты исследований показали статистически значимую многолетнюю связь осадков с годовым стоком, однако теснота такой связи зависит от различных характеристик бассейна [1, 11]. В [11] отмечено, что в маловодные и в многоводные годы коэффициент корреляции между осадками и стоком увеличивался, что указывает на возрастание роли осадков в формировании стока в экстремальные по водности годы. Вместе с тем очевидно, что при изучении изменений речного стока необходимо учитывать не только приходную, но и расходную составляющие водного баланса, уровень грунтовых вод, почвенную влажность, условия увлажнения в предыдущие периоды.

Цель работы состоит в исследовании региональных особенностей изменений годового атмосферного увлажнения на ЕЧР, а также характеристик лет с существенным дефицитом увлажнения в бассейнах крупных рек во второй половине XX – начале XXI вв. В статье предпринимается попытка исследовать связь речного стока с условиями недостаточного увлажнения в бассейнах.

ТЕРРИТОРИЯ, ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Понятие засухи достаточно сложное из-за многофакторности ее формирования. Несмотря на разнообразие предлагаемых методов определения засухи, единого критерия определения засухи пока не существует. Отечественными исследователями рассматривались многие аспекты типов засух [13, 17, 31, 33]. Недостаток большинства существующих критериев засухи – эмпирический подход.

Исследован недостаток увлажнения территории, под которым понимается разность осадков и потенциальной испаряемости. Принято считать, что засухи на ЕЧР наблюдаются южнее 50° с.ш. Однако отметим, что крупномасштабные экстремальные засухи, такие как летние засухи в 1972 и 2010 гг., охватывали и регионы, расположенные к С от 50° с.ш. [37]. Вместо термина “засухи в годовом масштабе” авторами настоящей статьи использован термин “существенный дефицит увлажнения”, на их взгляд более уместный при исследовании территории, включающей в себя север ЕЧР. Для количественной оценки повторяемости лет с условиями недостаточного увлажнения в речных бассейнах на ЕЧР применен относительно новый количественный показатель – стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index). SPEI при определении засухи принимает в расчет не только осадки, но и испаряемость (потенциально возможное испарение, не ограниченное запасами воды). Алгоритм расчета SPEI аналогичен алгоритму получения стандартизированного индекса осадков SPI (Standardized Precipitation Index), рекомендованного Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) для выявления метеорологической засухи [65]. Результаты исследований показали, что при больших временных масштабах наблюдается увеличение корреляции между SPEI и индексом Палмера PDSI (Palmer drought severity index) [62, 66]. PDSI имеет преимущество при использовании в качестве критерия гидрологических засух, поскольку рассчитывается по упрощенной схеме водного баланса [49]. Вместе с тем в работе [63] показана более тесная связь речного стока с 12-месячным SPEI, чем с PDSI. Применительно к ЕЧР в той же работе аналогичные выводы сделаны для стока Северной Двины и Печоры. В работе [12] подчеркивается, что SPEI более адекватно описывает условия возникновения катастрофических явлений, чем PDSI. На фоне критики водобалансовой модели, используемой при получении PDSI, вопросы о преимуществе того или иного количественного показателя условий увлажнения по-прежнему остаются открытыми.

Индекс SPEI учитывает, помимо осадков, влияние испаряемости на аномалии увлажнения. SPEI рассчитывается путем преобразования функции вероятности лог-логистического распределения разности суммарных осадков и эвапотранспирации (наиболее близко соответствующей их распределению) в функцию нормального распределения с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением, равным единице [62]. Согласно применяемой при расчете SPEI методике, отрицательные значения индекса характеризуют условия увлажнения ниже климатической нормы, приводящие к его дефициту (что в масштабах года означает, что наблюдался засушливый год). Значения $SPEI \leq -1$, по статистике наблюдающиеся в 15.87% случаев, сигнализируют о засухе [62]. Метеорологическая засуха, выявленная по SPEI в масштабах более года, указывает на возможность гидрологической засухи [62, 66]. Преимущество подхода, использованного при расчете SPEI, состоит в объективном определении градаций интенсивности увлажнения в соответствии со свойствами функции нормального распределения [52]. Значения SPEI в интервале от -1.5 до -1 характеризуют значительный (ощутимый) дефицит годового увлажнения, сильный недостаток увлажнения наблюдается при значениях в интервале от -2 до -1.5 , а экстремальный — при значениях < -2 . Результаты не зависят от географической привязки и становятся объективно сравнимыми, например, в узлах регулярной сетки данных или на метеостанциях.

Для получения значений годового SPEI использованы данные о месячных суммах осадков и среднемесячной эвапотранспирации из глобального архива CRU TS 4.3 (Climatic Research Unit, Time Series) пространственного разрешения $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, подготовленного в Университете Восточной Англии [53]. Эвапотранспирация, которая отражает потенциальное испарение с поверхности воды и из почвы, а также транспирацию влаги растениями, вычислялась по методу Пенмана [60]. Используемый в работе метод расчета испаряемости, рекомендованный Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН — FAO (Food and Agriculture Organization) [41], основан на данных о радиационном балансе поверхности, температуре, относительной влажности воздуха и скорости ветра по формуле, которая характеризует потенциальное испарение с гипотетического хорошо развитого зеленого травяного покрова высотой 0.12 м и с полностью увлажненной почвой. Ранее авторами было выполнено сравнение различных методов расчета испаряемости в южной части Русской равнины, в результате которого метод Пенмана был отнесен к наиболее надежным [38]. В работе [36] показано, что повторяемость летних засух на юге ЕЧР, вычисленная с помощью SPEI и SPI, достаточно

хорошо согласована. В этой же работе выявлено различие идентификации летних засух с применением наиболее широко используемого в отечественной гидрометеорологической практике гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова и SPEI. Согласно ГТК в сопоставлении с данными по SPI и SPEI, летняя засуха наблюдалась чаще в Северо-Западном Прикаспии, а также в ряде областей Поволжья и Заволжья, но ее повторяемость недооценивалась для остальной территории на юге ЕЧР.

В данном исследовании значения SPEI получены с помощью инструментария, созданного в Пиренейском институте экологии (Instituto Pirenaico de Ecologia) [62]. Для анализа условий годового увлажнения использовался 12-месячный SPEI в декабре, который рассчитан по разности ежегодного количества осадков (мм) и суммарной за год эвапотранспирации (мм). Повторяемость лет с существенным дефицитом увлажнения на ЕЧР рассчитана в каждом узле сетки архива CRU за каждый год рассмотренного периода. Исследование современных изменений повторяемости таких лет проводилось в среднем за период 1991–2018 гг. в сравнении с базовым тридцатилетием 1961–1990 гг. Пространственное среднее повторяемости выполнено по территории бассейнов крупных рек ЕЧР: Волги, Дона, Печоры и Северной Двины. Статистическая значимость различий повторяемости оценивалась на основе критерия Пирсона χ^2 .

Исследовалась связь между SPEI в бассейне рек и суммарным годовым стоком, измеренным для рек: Волги — в замыкающем створе г. Волгограда, Дона — в ст. Раздорской, Печоры — в пос. Усть-Цильма, Северной Двины — в пос. Усть-Пинега. Информационной основой для исследования стока воды послужили многолетние ряды наблюдений на указанных гидрологических постах Росгидромета с 1936 по 2014 г. [7]. Заполнение пропусков данных для поста Северная Двина — Усть-Пинега выполнено методом гидрологической аналогии с использованием информации по ближайшим створам [30]. В качестве аналога использован ряд стока Северная Двина — Абрамково. Связь получена по 75-летнему ряду совместных наблюдений и характеризуется коэффициентом корреляции 0.92. При этом было принято предположение об аналогичных условиях формирования стока на двух участках бассейна Северной Двины, поскольку на 63% их территории условия совпадают.

Проблемам нестационарности рядов речного стока, в том числе поиску новых критериев ее определения, а также нестационарности рядов климатических переменных посвящены многие исследования (например, [14, 29]). Временные ряды стока и SPEI за весь период наблюдений

Таблица 1. Параметры множественной регрессии для стока Волги в период 1901–2012 гг. и Дона в 1901–2017 гг., а также I – SPEI в прошлом году, II – SPEI в текущем году (1 – переменные, 2 – коэффициент регрессии, 3 – R (накопленный), 4 – R^2 (накопленный), 5 – стандартная ошибка (стандартное отклонение для остатков), 6 – критерий Стьюдента с количеством степеней свободы ($N = 109$ для Волги и $N = 111$ для Дона), 7 – статистическая значимость (p – value); все параметры регрессии статистически значимы при $p \leq 0.05$)

1	2	3	4	5	6	7
Волга						
I	36.7	0.65	0.43	3.67	10.03	<0.000001
II	22.73	0.76	0.57	3.7	6.1	<0.000001
Дон						
I	4.66	0.44	0.19	0.82	5.67	0.000001
II	2.77	0.52	0.27	0.83	3.35	0.001

проверены на стационарность с помощью широко используемого критерия Дики–Фуллера [50]. Результаты показали стационарность по математическому ожиданию временного ряда стока Дона, а также временных рядов SPEI, осредненного в бассейнах рассмотренных рек. Ряды стока Волги, Северной Двины и Печоры становятся стационарными при извлечении из них имеющихся линейных трендов.

Для определения связи между стоком Волги в период 1901–2012 гг., а также Дона в 1901–2017 гг. и SPEI в текущем, прошлом и позапрошлом годах использован метод множественной регрессии. Изменчивостью SPEI текущего и предыдущего года удалось объяснить 57% изменчивости стока Волги и 27% стока Дона (табл. 1).

“Разведочное” моделирование статистических связей между годовыми увлажнением и стоком показало, что характер связи в бассейнах Волги и Дона отличается от такового в бассейнах Печоры и Северной Двины. Так, в бассейнах Волги и Дона наиболее тесная связь наблюдается между стоком текущего года и SPEI за текущий и прошлый год. Коэффициенты корреляции составили 0.77 между рядами с трендами и между рядами с удаленными трендами для Волги в период 1901–2012 гг.; 0.52 между рядами с трендами и 0.58 между рядами с удаленными трендами для Дона в 1901–2017 гг. Для бассейнов Печоры и Северной Двины картина следующая: наиболее тесная связь обнаружена между временными рядами стока и SPEI без сдвига с коэффициентом корреляции 0.64 между рядами с трендами и 0.66 между рядами с удаленными трендами для бассейна Печоры в 1932–2012 гг., 0.68 между рядами с трендами и 0.69 между рядами с удаленными трендами для бассейна Северной Двины в 1901–2014 гг. Полученные результаты закономерны, так как годовой сток на арктических реках тесно связан со стоком весеннего половодья, в течение которого проходит более половины годового объема воды, и осадками холодного периода [61]. Хотя рост зимней температуры и приводит к некоторому

пополнению запасов грунтовых вод и к увеличению стока межлетних периодов для арктических рек, он не столь заметен по сравнению с более южными регионами ЕЧР. Маловодные годы и годы экстремально низкого стока определялись на основе отнесения их к группе лет 75%-й и 95%-й обеспеченности соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование показало, что повторяемость лет с существенным дефицитом увлажнения в период 1961–1990 гг. была наибольшей в верховьях Волги и Камы (до 27 событий/100 лет в Ивановской, Тверской и Пермской областях), в верховьях и устьевой части бассейна Северной Двины (до 30 событий/100 лет в Кировской и Архангельской областях), в верховьях и устьевой части бассейна Печоры (до 17 событий/100 лет) и в бассейне Дона (до 23 событий/100 лет в Ростовской и Белгородской областях) (рис. 1а). Изменения повторяемости лет с существенным дефицитом увлажнения на ЕЧР в 1991–2018 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. были разнонаправленными. Наиболее сильное статистически значимое снижение повторяемости лет с существенным дефицитом увлажнения (рис. 1б) отмечалось в тех регионах, где в 1961–1990 гг. их повторяемость была наибольшей (рис. 1а). В частности, в северо-восточной части бассейна Волги повторяемость снизилась в среднем на 17 случаев/100 лет в бассейнах рек Камы, Вятки и Вишеры; в бассейне Северной Двины – в среднем на 22 случая/100 лет в устье реки и на 16 случаев/100 лет в бассейне р. Лузы (рис. 1б). Как показано на рис. 1б, статистически значимый и наибольший рост повторяемости лет с существенным недостатком увлажнения также наблюдался в западной части бассейна Северной Двины (до 21 случая/100 лет в бассейне р. Вологды) и на Верхней Волге (до 21 случая/100 лет в бассейне р. Шексны), а также в юго-восточной части бассейна Волги (до 16 случаев/100 лет в бассейне р. Самары и до 15 случаев/100 лет в бассей-

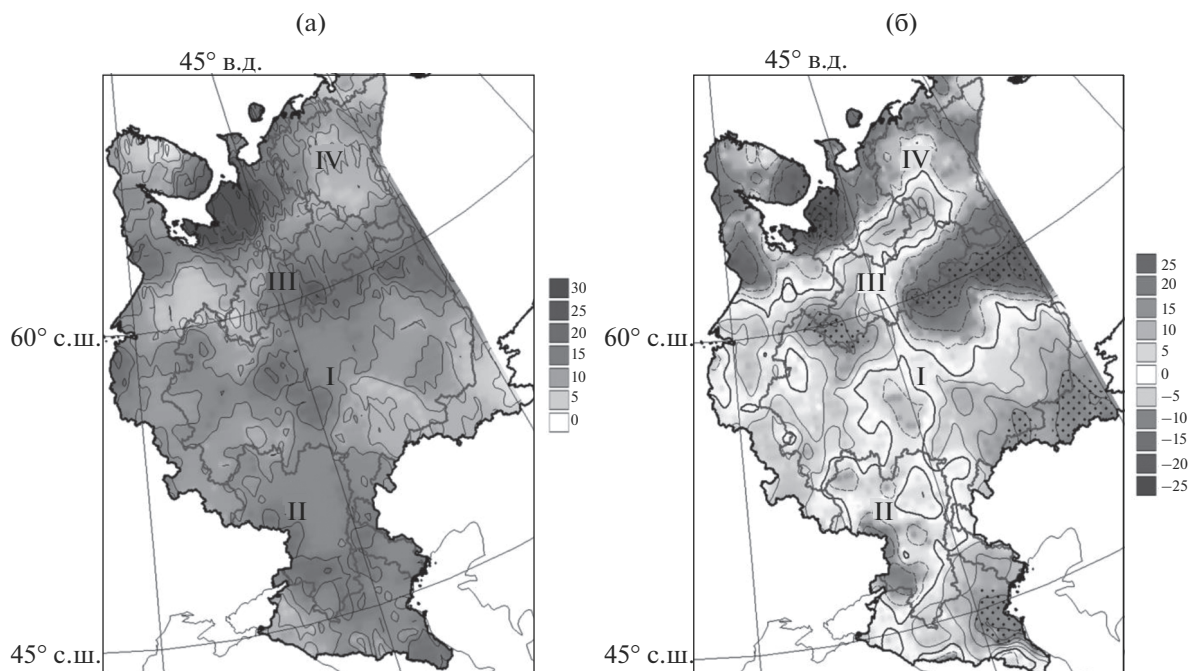


Рис. 1. Повторяемость лет с существенным недостатком увлажнения (число случаев/100 лет) в период 1961–1990 гг. (а) и ее изменения (число случаев/100 лет) в период 1991–2018 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. (б) в бассейнах Волги (I), Дона (II), Северной Двины (III) и Печоры (IV). Границы бассейнов обозначены полужирной сплошной линией. Изолинии проведены с шагом 5 (положительные изменения показаны сплошными линиями, а отрицательные – пунктирными линиями). Статистически значимые изменения на уровне 0.05 отмечены точками.

не р. Белой). В среднем по территории бассейна увеличение повторяемости лет с существенным дефицитом увлажнения в 1991–2018 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. отмечалось в бассейнах Волги и Северной Двины, а ее снижение – в бассейнах Дона и Печоры (табл. 2). При этом региональные различия повторяемости лет с существенным дефицитом увлажнения в бассейне Дона были статистически незначимыми. Интенсивность наблюдаемого в 1991–2018 гг. увлажнения снизилась по сравнению с предшествующим тридцатилетним периодом во всех рассмотренных бассейнах, кроме Печоры. Однако изменения были статистически незначимыми.

В регионах на юге ЕЧР вплоть до 1990-х гг. (сначала в западной, а затем в восточной ее частях с разницей в 5–10 лет) наблюдалось медленное повышение увлажнения (гумидизация климата), затем в конце XX в. произошла смена тенденции увлажнения [18]. Выявленное увеличение повторяемости лет с существенным недостатком увлажнения на большей части бассейна Волги в период 1991–2018 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. в сочетании с наметившейся тенденцией снижения годового увлажнения в регионах на юге ЕЧР может привести к негативным последствиям для стока рек в бассейнах Дона и Волги уже в ближайшие десятилетия.

Таблица 2. Повторяемость лет (число случаев/100 лет) с существенным недостатком увлажнения (I); с увлажнением ниже нормы два года подряд (II); с увлажнением ниже нормы два года подряд, в один из которых отмечался существенный недостаток увлажнения (III); по индексу SPEI – в 1961–1990 и 1991–2018 гг. в среднем в бассейнах Волги, Дона, Северной Двины и Печоры

Бассейн	Период, годы					
	1961–1990	1991–2018	1961–1990	1991–2018	1961–1990	1991–2018
	I		II		III	
Волга	7	11	3	14	3	11
Дон	17	11	20	29	10	7
Печора	10	4	27	0	17	0
Северная Двина	13	14	27	14	13	4

Уменьшение повторяемости лет с существенным недостатком увлажнения в северной части ЕЧР в период 1991–2018 гг. по сравнению с предыдущим тридцатилетием — следствие увеличения циклонической активности в исследуемом регионе. Ранее было установлено, что положительные тренды повторяемости циклонов отмечались в высоких широтах, в том числе на Европейском Севере России, во второй половине XX—начале XXI вв. [47]. Полученные результаты не противоречат данным как наблюдений, так и моделирования о смещении к полюсу траекторий движения циклонов средних широт при потеплении климата [44, 58, 67].

Как отмечено выше, в бассейнах Волги и Дона наиболее тесная связь наблюдается между стоком текущего года и индексом SPEI за текущий и прошлый годы. Вклад изменений годового увлажнения предшествующего года в изменчивость стока по сравнению с текущим годом выше в 2.9 раза для Волги и в 2.6 раза для Дона (табл. 1). Во всех двенадцати случаях маловодных лет на Волге в период 1961–2012 гг. недостаток увлажнения в ее бассейне зарегистрирован в текущем или предшествующем году (рис. 2а). При этом в половине случаев маловодных лет дефицит увлажнения наблюдался и в текущем, и в предыдущем году. Результаты анализа данных SPEI указывают на то, что недостаточное увлажнение в бассейне Волги в 1.6 раза повышает вероятность маловодности следующего года на Волге. В 80% от двадцати маловодных лет в бассейне Дона в период 1961–2017 гг. (рис. 2б) недостаток увлажнения ощущался в текущем году (рис. 3), а половина маловодных лет сопровождалась недостатком увлажнения различной интенсивности еще и в предшествующем году. Тесная связь стока Волги и Дона с увлажнением не только текущего, но и предыдущих лет отмечена в [21, 25]. В целом для бассейнов на юге ЕЧР характерно возрастание доли грунтового питания в последние годы, а также снижение доли половодья в годовом стоке [10], что также увеличивает роль увлажнения предыдущих лет в формировании речного стока. Отметим также, что чем больше площадь водосборного бассейна, тем больше вклад перечисленных факторов в колебания стока [25]. Как отражено в табл. 2, повторяемость случаев увлажнения ниже нормы в течение двух лет подряд в 1991–2018 гг. возросла по сравнению с 1961–1990 гг.: в 4.7 раза в бассейне Волги и в 1.4 раза в бассейне Дона. При этом в бассейне Волги в тот же период в 3.7 раза стали чаще наблюдаться пары идущих друг за другом лет пониженного увлажнения, в один из которых ощущался сильный недостаток увлажнения. На основе выявленной связи обнаружено, что речной сток в годы дефицита увлажнения может снизиться по сравнению с нормой: на 4.4% для Волги, на 8%

для Дона, на 8.7% для Печоры и на 10.9% для Северной Двины.

Анализируя периоды повышенной и пониженной водности на исследуемых реках, можно отметить, что наиболее продолжительное маловодье на Волге наблюдалось в 1935–1941 гг. [22]. Однако увлажнение ниже нормы не всегда является индикатором маловодного года на Волге, как, например, это отмечалось в 1972, 1997 и 2010 гг. Вместе с тем ежегодный существенный дефицит увлажнения в бассейне в период 1972–1975 гг. привел к экстремально низкому стоку Волги (в 1.4 раза ниже нормы) в 1973 и 1975 гг.

Наиболее продолжительная маловодная фаза на Дону во второй половине XX — начале XXI вв. наблюдалась в 1971–1977 гг., а также с середины 2000-х до конца 2010-х гг. [20]. Экстремально низкий сток Дона (ниже нормы в 2.2 раза в 1972 г., в 1.8 раза в 1975 и 1976 гг. и в 1.9 раза в 2015 г.) отмечен в годы существенного недостатка увлажнения в бассейне на фоне его систематического понижения в течение нескольких предыдущих лет. Исключение составил 2003 г. с экстремально низким стоком Дона (в 3.9 раза по сравнению с нормой) и отсутствием дефицита увлажнения, а при достаточно влажных условиях — в предыдущие два года (рис. 3).

При анализе многолетнего ряда стока Северной Двины выделяются три периода: многоводный — до 1930-х гг., маловодный — до 1970-х гг., вновь многоводный [24]. При этом сток арктических рек ЕЧР менялся достаточно согласованно. Так, для Печоры также характерен относительно маловодный период с середины 1930-х до середины 1950-х гг., а в последние годы наблюдается увеличение среднегодовых расходов воды [39]. Все шесть маловодных лет на Печоре в период 1961–2012 гг. (рис. 2в) и 80% из двадцати маловодных лет на Северной Двине в 1961–2014 гг. (рис. 2г) отмечались на фоне увлажнения ниже климатической нормы (рис. 3). При этом в половине маловодных лет на Печоре и в 57% маловодных лет на Северной Двине существенный недостаток увлажнения ощущался и в текущем, и в предшествующем годах. Экстремально низкий сток Печоры — в 1.3 раза ниже нормы в 1970 г. и в 1.4 раза в 1980 г. — фиксировался на фоне недостаточного увлажнения в том же году (рис. 3). Экстремально понижение стока Северной Двины в 1967 и 1975 гг. (в 1.4 раза по сравнению с нормой) отмечалось при существенном дефиците увлажнения в бассейне реки. Отметим, что году с экстремально низким стоком Северной Двины (2006 г., 0.7 нормы) при отсутствии дефицита увлажнения предшествовал маловодный год на фоне значительно дефицита увлажнения.

Полученные результаты лишней раз подтвердили многофакторность формирования стока.

что авторы связывают с взаимной компенсацией разнонаправленных изменений увлажнения в разные сезоны.

Примечательно, что сильный и экстремальный дефицит годового увлажнения в бассейнах крупных рек в некоторые из перечисленных лет (рис. 3) сопровождался наиболее сильными, обширными летними засухами на ЕЧР, которые, как правило, развиваются на фоне атмосферного блокирования. Это, прежде всего, экстремальные летние засухи 1972 и 2010 гг., распространившиеся до северных регионов ЕЧР, где обычно подобная засуха не наблюдается [37]. Так, в 1972 г. граница сильной засухи продвинулась в южную часть бассейна Северной Двины [37]. Особенностью засух 1972 и 2010 гг. было то, что сильный недостаток атмосферной влаги в южных областях ЕЧР ощущался, помимо лета, и в мае [34]. Наиболее ощутимым он был в мае в 1972 г. в Поволжье. В 1975 г. сильной летней засухой была охвачена практически вся территория в южной части ЕЧР [35], особенно в бассейнах Волги и Дона (рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило получить следующие результаты.

С использованием данных стандартизированного индекса осадков и эвапотранспирации SPEI установлено, что изменения повторяемости лет с существенным недостатком годового увлажнения в 1991–2018 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. были разнонаправленными как на всей ЕЧР, так и в бассейнах четырех ее крупных рек. Наиболее сильно уменьшилась повторяемость таких лет в северо-восточной части бассейна Волги, а также в северо-западной и южной частях бассейна Северной Двины. Наибольший статистически значимый рост повторяемости лет существенного недостатка увлажнения в тот же период отмечен в западной части бассейна Северной Двины, в северо-западной и юго-восточной частях бассейна Волги. Изменения повторяемости указанных лет не превысили 22 случаев/100 лет. Установлено, что среднее по всем рассмотренным речным бассейнам (кроме Печоры) снижение интенсивности увлажнения в 1991–2018 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. было статистически незначимым.

Исследование показало тесную связь между стоком крупных рек ЕЧР и годовым увлажнением в их бассейне. Маловодные годы для бассейнов Волги и Дона в основном случаются при дефиците увлажнения либо в текущем году, либо в течение двух лет подряд. Сток северных рек (Северная Двина и Печора) реагирует на недостаточное увлажнение в их бассейнах в том же году. Выявлено, что увлажнение предшествующего года играет более важную роль в формировании

стока Волги, чем увлажнение текущего года. Маловодный год на Волге следовал за годом недостатка увлажнения в ее бассейне в 37% случаев. При наблюдении дефицита увлажнения в бассейне одновременно в текущем и следующем годах текущий был маловодным в 75% случаев на Волге и в 62% случаев на Дону. Обнаружено, что повторяемость случаев годового увлажнения ниже нормы в течение двух лет подряд возросла в 4.7 раза в бассейне Волги и в 1.4 раза в бассейне Дона в 1991–2018 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. В бассейне Волги в тот же период в 3.7 раза стали чаще наблюдаться пары идущих друг за другом засушливых лет, в один из которых отмечался существенный дефицит увлажнения. Вместе с тем недостаточное увлажнение в бассейне Волги в 1.6 раза повышает вероятность маловодности следующего года на Волге. Показано, что в засушливые годы сток понижался по сравнению с нормой на среднем на 4.4% для Волги, на 8% для Дона, на 8.7% для Печоры и на 10.9% для Северной Двины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Болгов М.В., Сенцова Н.И.* Байесовские оценки расчетных характеристик минимального стока рек в нестационарных условиях // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 11. С. 70–80.
2. *Болгов М.В., Федоров В.М., Исмаилов Г.Х.* Оценка условий формирования маловодных периодов в бассейне Волги // *Природообустройство*. 2009. № 2. С. 79–84.
3. *Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова.* СПб.: ГГИ, 2008. 598 с.
4. *Васильев Д.Ю., Лукманов Р.Л., Ферантонтов Ю.И., Чувывров А.Н.* Цикличность гидрометеорологических характеристик на примере Башкирии // *ДАН*. 2012. Т. 447. № 3. С. 331–334.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
6. *Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А.* Природно-климатические и антропогенные изменения стока Волги и Дона // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 2. С. 55–78.
7. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное изд.
8. *Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л.* Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС, 2015. 315 с.
9. *Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Телегина А.А.* Изменения поверхностного и подземного стока рек России и их режимов в условиях нестационарного климата // *Вестн. РФФИ*. 2013. Т. 6. № 78. С. 34–42.

10. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А. Изменение зимнего стока рек Европейской части России // *Вод. ресурсы*. 2015. Т. 42. № 6. С. 581–588.
11. Долгов С.В. Климатические изменения годового речного стока и его составляющих в Европейской части России // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2011. № 6. С. 78–86.
12. Добровольский С.Г., Истомина М.Н., Лебедева И.П., Соломонова И.В. Основные регионы засух и наводнений мира: природные параметры, характеристики ущербов, особенности динамики, идентификация с помощью индекса SPEI // *Научные проблемы оздоровления Российских рек и пути их решения*. Сб. науч. тр. конференции. Нижний Новгород: Изд-во Студия Ф1, 2019. С. 46–51.
13. Добровольский С.Г., Истомина М.Н., Пасечкина В.Ю. Изменения естественных параметров экстремальных гидрологических явлений в России и в мире и вызванных ими ущербов: наводнения и засухи // *Вопр. географии*. 2018. № 145. С. 183–193.
14. Добровольский С.Г., Соломонова И.В. О вековых изменениях параметров стационарности колебаний речного стока // *Уч. зап. РГГУ*. 2018. № 53. С. 123–144.
15. Дроздов О.А., Григорьева А.С. Многолетние циклические колебания атмосферных осадков на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 158 с.
16. Зайцева И.С. Маловодные годы в бассейне Волги: природные и антропогенные факторы. М.: ИГ АН СССР, 1990. 184 с.
17. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Черенкова Е.А. Динамика засух в Европейской России в ситуации глобального потепления // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2007. Т. 21. С. 160–182.
18. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. Тенденции увлажнения зернового пояса России в начале XXI века // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2013. Т. 25. С. 251–264.
19. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2020. № 2. С. 207–217.
20. Илич В.П., Киреева М.Б., Сазонов А.А., Михайлюкова П.Г., Харламов М.А. Особенности формирования маловодных периодов в бассейне реки Дон (на примере маловодья 2007–2015 гг.) // *Третьи Виноградские чтения. Грани гидрологии*. 2018. С. 877–881.
21. Исмаилов Г.Х., Федоров В.М. Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна р. Волги // *Вод. ресурсы*. 2008. Т. 35. № 3. С. 259–276.
22. Исмаилов Г.Х., Федоров В.М. Межгодовая изменчивость элементов водного баланса реки Волги в условиях маловодья // *Природообустройство*. 2010. № 2. С. 79–86.
23. Кренке А.Н., Черенкова Е.А., Чернавская М.М. Устойчивость залегающего снежного покрова на территории России в связи с изменением климата // *Лед и снег*. 2012. Т. 52. № 1. С. 29–37.
24. Магрицкий Д.В., Скрипник Е.Н. Опасные гидрологические процессы в устье Северной Двины и факторы их многолетней изменчивости // *Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География*. 2016. № 6. С. 59–70.
25. Малинин В.Н. О долгосрочном прогнозе местного стока в Центральном Федеральном округе // *Уч. зап. РГГУ*. 2006. № 3. С. 67–74.
26. Мохов И.И. Действие как интегральная характеристика климатических структур: оценки для атмосферных блокингов // *Докл. РАН*. 2006. Т. 409. № 3. С. 403–406.
27. Мохов И.И., Хон В.Ч., Тимажев А.В., Чернокульский А.В., Семенов В.А. Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне р. Амур в связи с климатическими изменениями // *Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации*. М.: Росгидромет, 2014. С. 81–120.
28. Попова В.В. Колебания осадков на Русской равнине за последнее тысячелетие // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2001. № 1. С. 42–49.
29. Раунер Ю.Л. Климат и урожайность зерновых культур. М.: Наука, 1981. 163 с.
30. Речной сток и гидрологические расчеты. Курс лекций: учебное пособие / Под ред. В.М. Евстигнеева, Д.В. Магрицкого. М.: Триумф, 2018. 271 с.
31. Страшная А.И., Тебуев Х.Х., Деревянко А.Н. Агрометеорологические условия формирования урожая сельскохозяйственных культур в 1991 г. // *Метеорология и гидрология*. 1992. № 7. С. 114–119.
32. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Поваляшников Е.С. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // *Вопр. географии*. 2018. № 145. С. 233–251.
33. Хомякова Т.В., Зойдзе Е.К. Агроклиматическая оценка почвенных засух на европейской территории России (по наземным данным) // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 9. С. 75–86.
34. Черенкова Е.А. Анализ особенностей обширных атмосферных засух на юге Европейской России // *Арид. экосистемы*. 2012. Т. 18. № 4 (53). С. 13–21.
35. Черенкова Е.А. Количественные оценки атмосферных засух в Европейской России // *Изв. РАН. Сер. географическая*. 2013. № 6. С. 76–85.
36. Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // *Фундаментальная и приклад. климатология*. 2016. Т. 2. С. 79–94.
37. Черенкова Е.А., Кононова Н.К. Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории Европейской части России // *Тр. ГГО*. 2012. № 565. С. 165–187.
38. Черенкова Е.А., Шумова Н.А. Испаряемость в количественных показателях климата // *Арид. экосистемы*. 2007. Т. 13. № 33–34. С. 55–67.
39. Чупаков А.В., Широкова Л.С., Покровский О.С. Долгосрочные вариации стока реки Печоры. Сезонная динамика элементарного состава вод // *Проблемы обеспечения экологической безопасности и устой-*

- чивое развитие арктических территорий. Сб. тр. конф. Архангельск: Изд-во ОМ-медиа, 2019. С. 436–439.
40. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // Гидрологические последствия изменений климата. Тр. Брит.-Рос. конф. Барнаул: Пять плюс, 2009. С. 143–151.
41. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.
42. Allen M.R., Ingram W.J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle // Nature. 2002. 419. 224–232.
43. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J., Trigo R.M., Garcia-Herrera R. The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe // Sci. 2011. V. 332. P. 220–224.
44. Bengtsson L., Hodges K.I., Roeckner E. Storm tracks and climate change // J. Climate. 2006. V. 19. № 15. P. 3518–3543.
45. Briffa K.R., Van Der Schrier G., Jones P.D. Wet and dry summers in Europe since 1750: evidence of increasing drought // Int. J. Climatol. 2009. V. 29. 1894–1905.
46. Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.
47. Cherenkova E.A., Dolgova E.A. Multidecadal climate variability in the north of the Eastern European Plain and the tree-ring growth response // Proc. SPIE. 25th Int. Sympos. Atm. Ocean Optics: Atmospheric Physics. Novosibirsk, 2019. V. 11208. P. 1120879-1–1120879-5.
48. Folland C.K., Karl T.R. Observed climate variability and change // Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. P. 99–181.
49. Dai A. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008 // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D12115.
50. Dickey D.A., Fuller W.A. Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root // J. Am. Statistical Association. 1979. V. 74. P. 427–431.
51. Groisman P.Ya., Knight R.W., Easterling D.R., Karl T.R., Hegerl G.C., Razuvaev V.N. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record // J. Clim. 2005. V. 18. P. 1326–1350.
52. Guttman N.B. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. // J. Am. Water Resour. Association. 1999. V. 35 (2). P. 311–322.
53. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // Int. J. Climatol. 2014. V. 34 (3). P. 623–642.
54. Held I.M., Soden B.J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming // J. Climate. 2006. V. 19. P. 5686–5699.
55. Hu Y., Fu Q. Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979 // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. P. 5229–5236.
56. Huntington T.G. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis // J. Hydrol. 2006. V. 319. P. 83–95.
57. Karl T.R., Coauthors. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. P. 2253–2258.
58. Kushner P.J., Held I.M., Delworth T.L. Southern Hemisphere atmospheric circulation response to global warming // J. Clim. 2001. V. 14. P. 2238–2249.
59. Lu J., Vecchi G.A., Reichler T. Expansion of the Hadley cell under global warming // Geophys. Res. Letters. 2007. V. 34 (6). L06805.
60. Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Roy. Soc. London: A193, 1948. P. 120–146.
61. Rawlins M.A., Ye H., Yang D., Shiklomanov A., McDonald K.C. Divergence in seasonal hydrology across northern Eurasia: emerging trends and water cycle linkages // J. Geophys. Res. 2009. № 114. P. D18119.
62. Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // J. Climate. 2010. V. 23. P. 1696–1718.
63. Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. Comment on “Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900–2008” by A. Dai // J. Geophys. Res.: Atmos. 2011. V. 116 (19). P. D19112.
64. Wiedenmann J.M., Lupo A.R., Mokhov I.I., Tikhonova E.A. The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic // J. Climate. 2002. V. 15. P. 3459–3473.
65. WMO 2009. Experts agree on a universal drought index to cope with climate risk Press Release. No. 872. [Электронный ресурс]. <https://www.preventionweb.net/news/view/12077> (дата обращения: 07.04.2020)
66. Wolf J.W. Evaluation of Drought Metrics in Tracking Streamflow in Idaho. Master’s thesis, Moscow: Univ. Idaho, 2012. 38 p.
67. Yin J.H. A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L18701.