

НАБЛЮДАЕМЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЧНОЙ СТОК (НА ПРИМЕРЕ ДОНА)

© 2024 г. Е. А. Черенкова^{1, 2, *}, А. Г. Георгиади¹, А. Н. Золотокрылин¹,
Е. А. Кашутина¹

¹Институт географии РАН, Россия, Москва

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Россия, Москва

*e-mail: cherenkova@igras.ru

Поступила в редакцию 11.10.2023 г.

После доработки 27.12.2023 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Исследуются современные изменения климата на Восточно-Европейской равнине, а также реакция на них речного стока Дона. Значительное потепление в среднем на 1.8°C зимой на равнине в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. привело к увеличению числа дней с положительной температурой воздуха. Наблюдалось увеличение количества осенне-зимних атмосферных осадков, а также доли жидких осадков в зимний сезон с существенным их ростом на западе и в центре. В бассейне Дона в тот же период отмечалось наибольшее по сравнению с остальными сезонами потепление зимой на 1.6°C и слабо выраженное увеличение количества осадков во все сезоны, кроме лета. Заметное внутригодовое перераспределение стока Дона с 1990-х годов по сравнению с 1961–1990 гг. изменило соотношение меженного стока и стока половодья. Значимый рост стока отмечался во все месяцы года, кроме апреля и мая, в апреле он существенно снизился. Наибольшее увеличение стока на 55.7% наблюдалось в январе. Показано, что почти половина многолетней изменчивости стока Дона в январе происходила за счет оттепелей, а около 20% было обусловлено изменениями осадков в осенне-зимний период. Роль оттепелей в формировании зимнего стока, повторяемость которых увеличилась в 2.6 раза за последние тридцать лет возросла, а влияние суммарных осадков, наоборот, снизилось. Проекция климатических моделей в XXI в. предполагают постепенное расширение на северо-восток Восточно-Европейской равнины границ территории проявления зимних оттепелей, сопровождающихся интенсивным снеготаянием, увеличением речного стока зимой и снижением половодья. По сценариям умеренного и агрессивного антропогенного воздействия на климат в период 2061–2100 гг., границы могут сместиться не только в северо-западную часть бассейна Волги, но и в бассейны рек Европейского севера России.

Ключевые слова: глобальное потепление, температура воздуха, атмосферные осадки, речной сток, оттепели, климатические модели, Восточно-Европейская равнина

DOI: 10.31857/S2587556624030075 EDN: SOFGKD

ВВЕДЕНИЕ

Согласно оценкам Межправительственной группы по изменениям климата, глобальное потепление происходит тревожно быстрыми темпами, его последствия для многих экосистем оцениваются как беспрецедентные (IPCC, 2023). Так, глобальная приземная температура в первые два десятилетия XXI в. была на 0.99°C выше, а в 2011–2020 гг. уже на 1.1°C выше, чем в 1850–1900 гг. Потепление оказывает значительное влияние на изменения компонентов водного цикла (Barnett et al., 2005). Усиление водного

цикла из-за потепления климата и увеличения влагоемкости атмосферы приводит к повышению рисков наводнений в различных регионах мира (IPCC, 2023). Результаты климатического моделирования показали, что ожидаемое потепление будет определяющим фактором в интенсификации процессов гидрологического цикла (Christensen J. and Christensen O., 2007). Отмечается, что повторяемость наводнений в Европе возросла в последние десятилетия (Alfieri et al., 2015; Kundzewicz et al., 2013). При этом интенсивность наводнений превысила предыдущие зарегистрированные уровни: например, в слу-

чае экстремальных наводнений в Центральной Европе — летом и осенью (Barredo, 2007; Blöschl et al., 2013), а также зимой (Engel, 1997). Вместе с тем было высказано предположение о том, что теплые зимы и более раннее снеготаяние снизят пики весеннего снеготаяния в Европе, и особенно, на ее северо-востоке (Dankers and Feyen, 2008). Оно, в частности, подтверждается фактом снижения с 1970-х годов повторяемости пиков весеннего половодья на крупных европейских реках Даугава и Неман (Sarauskiene et al., 2015). На увеличение повторяемости наводнений и их интенсивности во многих регионах Европы в XXI в. вследствие роста экстремальных осадков указывают модельные проекции [например, (Alfieri et al., 2015; Dankers and Feyen, 2009; Lehner et al., 2006)].

Помимо антропогенного влияния, в формировании изменчивости климата в холодный период в регионах Европы на десятилетнем и межгодовом временном масштабе значительный вклад вносит естественная климатическая изменчивость, в том числе Североатлантическое колебание (Hurrell, 1995), Атлантическая мультideкадная осцилляция (Черенкова, Семенов, 2017; Knight et al., 2006; Sutton and Dong, 2012), а также стремительное сокращение ледового покрова в Арктике в последние десятилетия (Petoukhov and Semenov, 2010). Ранее при изучении влияния атмосферной циркуляции на изменения осадков нами было установлено, что 34.2% изменчивости ведущего режима осадков зимой в регионах Европы формируется за счет Северо-Атлантического колебания, а 7.4% объясняется долгопериодной изменчивостью температуры поверхности океана в Северной Атлантике (Черенкова, Семенов, 2017). О влиянии мультideкадной изменчивости климата в Северной Атлантике на изменения зимних осадков над Евразией свидетельствуют результаты численных экспериментов с глобальными климатическими моделями (Мохов и др., 2008). Согласно модельным оценкам, за счет аномальных потоков тепла из океана в атмосферу в Северной Атлантике и Арктике в результате перехода океана к современной теплой фазе в последние несколько десятилетий можно объяснить примерно половину потепления в Северном полушарии в этот период (Semenov et al., 2010).

Восточно-Европейская равнина (ВЕР) относится к территории максимального как наблюдаемого, так и прогнозируемого потепления (IPCC, 2023). Средняя скорость роста среднегодовой приземной температуры воздуха на Европейской территории России (ЕТР), занимающей большую часть ВЕР, составила $0.55^{\circ}\text{C}/10$ лет в период 1976–2020 гг. (Доклад ..., 2021), что превышает аналогичный показатель глобальной

температуры. При этом зимнее потепление на ЕТР со скоростью $0.72^{\circ}\text{C}/10$ лет признано наибольшим по сравнению с остальными сезонами.

Анализ климатических и гидрологических данных показал, что зимнее потепление и более раннее снеготаяние привело к сдвигу на более ранние сроки дат начала половодья рек ВЕР весной в период 1960–2010 гг. (Blöschl et al., 2017). При этом наибольшие скорости изменений наблюдались на западе равнины в бассейнах рек Даугава и Неман ($2-4$ дня/10 лет), а также на ее юге в бассейне р. Дон ($2-8$ дней/10 лет). Потепление привело к росту стока крупных рек ВЕР (рр. Печора, Мезень, Онега, Северная Двина, Волга) зимой в период 1975–2010 гг. по сравнению с 1946–1975 гг. от верхней части бассейна р. Северная Двина (на 50%) до низовьев рек Волги (на 120%) (Водные ..., 2008). Вместе с тем водность рек бассейна реки Дон в зимний период с 1975 по 2010 г. увеличилась от 20 до 100% и выше (Джамалов и др., 2015). Рост зимнего стока в период 1966–2012 гг. в бассейне р. Дон зафиксирован сетью гидропостов (Георгиади и др., 2014, 2020; Georgiadi et al., 2023). Следует отметить, что в бассейне Дона преобладало уменьшение повторяемости экстремальных суточных сумм осадков весной в период 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. (Zolotokrylin and Cherenkova, 2017). Меженный сток р. Дон, изменчивость которого отражает изменчивость естественных ресурсов подземных вод, статистически значительно увеличился (в 1.5–2 раза) в последние десятилетия по сравнению с периодом 1960–1970 гг. (Джамалов и др., 2013), а в период 1981–2011 гг. — на 40–60%, по данным (Георгиади и др., 2020; Frolova et al., 2011; Georgiadi et al., 2023). На зимний сток могут влиять факторы, напрямую не связанные с температурой, такие как, например, уровень грунтовых вод. Данные измерений уровня грунтовых вод в Федеральном заказнике “Каменная степь” (Воронежская область) свидетельствуют о повышении уровня с 7 до 4 м с середины прошлого века до 1990-х годов (Дмитриева, 2011а), хотя в последние годы происходило его существенное снижение.

Согласно опубликованным в (IPCC, 2023) выводам, прогнозируется продолжение зимнего потепления на территории России в XXI в., которое заметно превышает среднее глобальное потепление. Результаты анализа модельных проекций будущего климата показали, что рост температуры воздуха зимой на ВЕР в середине XXI в. может составить от 2.8°C на юге до 4.9°C на севере по сравнению с базовым периодом 1981–2000 гг. (Катцов, Говоркова, 2013). Длительное маловодье на Дону в последние десятилетия, которое негативно сказывается на хозяйственной деятельности, а также уязвимость региона к дефициту водных ресурсов обуславливает актуальность изучения

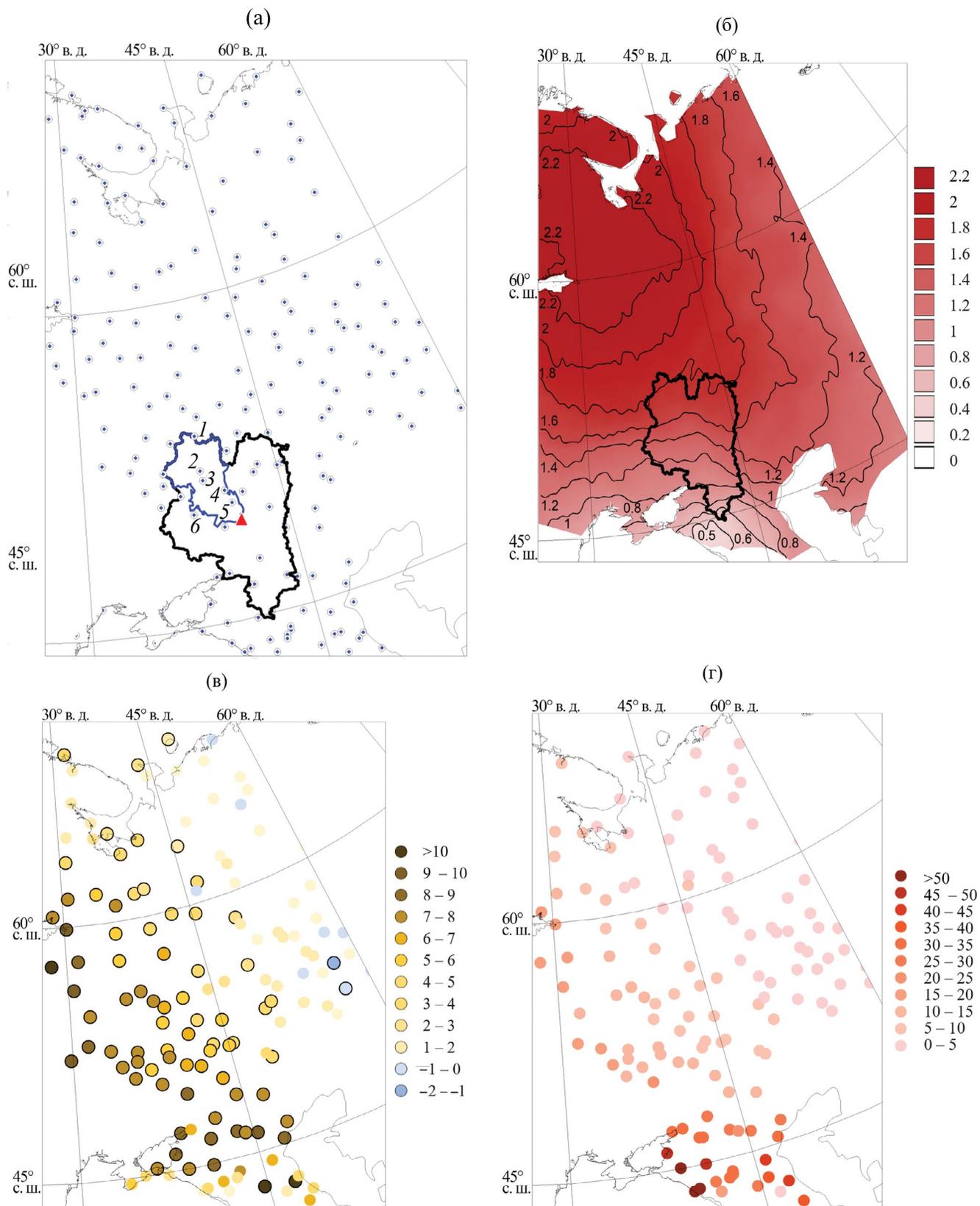


Рис. 1. Пространственное распределение метеостанций в бассейне Дона (1 – Павелец, 2 – Конь-Колодезь, 3 – Воронеж, 4 – Каменная Степь, 5 – Калач, 6 – Валуйки) (а), изменения температуры (°С) зимой (б) и числа дней с положительными температурами (дни) зимой (в) на ВЕР в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг., а также их среднегодовое значения (дни) зимой в 1961–1990 гг. (г). Граница бассейна Дона на рис. 1а и 1б показана жирной линией черного цвета. Граница бассейна Дона до Казанской на рис. 1а обведена контуром синего цвета, станция Казанская отмечена треугольником красного цвета. Изменения температуры воздуха зимой статистически значимы на уровне 0.05 на всей ВЕР. Значимые изменения числа оттепелей на рис. 1в показаны кругами, обведенными черным цветом.

изменений гидрологического отклика в бассейне Дона в связи с наблюдаемыми изменениями климата. Помимо этого, не менее актуальными являются исследования будущих климатических изменений, оказывающих наибольшее влияние на формирование речного стока на ВЕР.

Цель статьи состоит в том, чтобы: 1) исследовать изменения климата на Восточно-Европейской равнине во второй половине XX – начале XXI в.; 2) на примере р. Дон выявить реакцию внутригодового распределения стока (в особенности, зимнего стока) на климатические изменения; 3) оценить вклад основных климатических факторов в его изменения, а также 4) проанализировать сценарные изменения наиболее значимых факторов, которые могут повлиять на возможные изменения зимнего стока Дона в середине и в конце текущего столетия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изменения среднемесячной приземной температуры воздуха и месячных сумм осадков зимой на территории ВЕР в период 1961–2020 гг. исследовались по данным глобального архива CRU TS4.6 Университета Восточной Англии (University of East Anglia Climatic Research Unit) с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Harris et al., 2020).

По данным наблюдений за среднесуточной температурой сети метеостанций Росгидромет из архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД)¹, были рассчитаны число дней со средней суточной температурой больше 0°C ($T > 0$), в данном исследовании использованное как характеристика зимних оттепелей, а также суммы температур в эти дни за каждый год в период 1961–2020 гг. Доля жидкой фракции осадков, важных для понимания гидрологических изменений, в общем их количестве в среднем за месяц анализировалась по данным наблюдений за суточными осадками из того же архива ВНИИГМИ-МЦД. При расчете сумм жидких осадков использовался критерий отнесения осадков к жидкой их фракции при среднесуточной температуре воздуха $>1^\circ\text{C}$. При анализе суточных данных в расчет принимались временные ряды данных на метеостанциях, содержащие не более 10% пропущенных лет за изучаемый период.

¹ Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ), 2023б. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation> (дата обращения 25.08.2023).

К исследованию были также привлечены данные водного эквивалента снега (Snow Water Equivalent, SWE) с 1966 г. из архива наблюдений за характеристиками снега на метеорологических станциях сети Росгидромета². Согласно регламенту маршрутных снегосъемок, наблюдения за характеристиками снежного покрова, включающие измерение запаса воды в снеге (мм), осуществляются через каждые 10 дней в течение холодного периода (а также каждые 5 дней в промежутках между декадами в период интенсивного снеготаяния) отдельно для трех типов угодий (поле, лес и овраги). Были использованы данные SWE на станциях Калач, Павелец и Валуйки (рис. 1). Изменения рассмотренных климатических параметров в среднем за период 1991–2020 гг., а также SWE в 1966–2020 гг. оценивались по сравнению с климатической нормой в период 1961–1990 и 1966–1990 гг. соответственно. Статистическая значимость изменений определялась на уровне 0.05 (t -test Стьюдента).

В статье предпринята попытка выявить влияние наблюдаемых изменений климата на внутригодовое распределение стока р. Дон, с акцентом на оценку влияния климатических факторов на зимний сток. Бассейн Дона до станицы Казанская (координаты местоположения гидропоста – 47.54° с.ш., 40.65° в.д.) с площадью водосбора 102 тыс. км² (см. рис. 1а) был выбран в качестве объекта исследования. Этот бассейн характеризуется относительно небольшим антропогенным влиянием на формирование стока ввиду отсутствия крупных водохранилищ выше по течению. Многолетняя динамика средних расходов воды за половодье и зимнюю межень была исследована по данным наблюдений в упомянутом створе в период 1961–2014 гг. Средний годовой сток Дона в этом створе за весь период наблюдений (1881–2014 гг.) составил 10.2 км³/год. Минимум годового стока, равный 4.4 км³/год, зарегистрированный в 1972 г., во многом отразил последствия острого дефицита осадков из-за обширной сильной летне-осенней засухи на ВЕР, в центре которой оказался бассейн Дона (Черенкова, Кононова, 2012). Наибольший годовой сток по данным того же гидропоста (17.5 км³/год) наблюдался в 1942 г. Зимний сток в статье был рассмотрен более подробно ввиду того, что потепление на ВЕР зимой проходило более быстрыми темпами по сравнению с остальными сезонами (Доклад ..., 2021).

Для оценки вклада основных климатических факторов в многолетнюю изменчивость речного

² Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных “маршрутные снегомерные съемки”, 2023а. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620279. <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys> (дата обращения 25.08.2023).

стока в зимний сезон и в его отдельные месяцы был применен метод пошаговой множественной регрессии. Температура почвы не анализировалась в данной работе, поскольку она тесно связана с температурой воздуха. По нашим расчетам по данным метеостанций в бассейне реки корреляция между рядами обеих температур в период 1984–2013 гг. составляла 0.7. В качестве независимых переменных статистической модели использованы: число дней с положительной температурой воздуха и количество жидких осадков в зимние месяцы (с декабря по февраль), осредненные по данным наблюдений на 5 метеостанциях в границах бассейна Дона до Казанской (см. рис. 1а), суммарное количество осенне-зимних осадков (сентябрь–февраль), осадков за осень и за зиму в границах бассейна, а также SWE подекадно в феврале и на первую декаду марта на метеостанциях Павелец и Калач.

Для оценки возможных будущих изменений климата на ВЕР использовались данные международного проекта по сравнению глобальных моделей климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) (O’Neil et al., 2016). Для этого были привлечены проекции будущего климата ансамбля из 37 климатических моделей, которые включают суточные данные о температуре воздуха для периода инструментальных наблюдений и для условий сценарных экспериментов при умеренном (SSP245) и агрессивном (SSP585) антропогенном воздействии на климат. На ВЕР в различные периоды XXI в. были исследованы изменения границ территорий с климатическими условиями, которые потенциально могут привести к заметному перераспределению сезонного стока ввиду активного таяния снега зимой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения климата на ВЕР. Важное влияние на формирование стока рек в зимние месяцы на ВЕР, как и для многих равнинных рек умеренных широт Северного полушария, оказывают температуры зимой и осадки предзимнего и зимнего периода. Помимо этого, нельзя недооценивать важную роль изменений сумм отрицательных температур, а также соотношения жидких и твердых осадков. Анализ изменений температур зимой на ВЕР показал, что их статистически значимый рост в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. наблюдался на всей исследуемой территории. Как показано на рис. 1б, наиболее сильным зимнее потепление (до 2.2°C) было на северо-западе ВЕР. Несмотря на это, регионы с более теплыми зимами на юге и западе равнины, наиболее часто подверженные зимним оттепелям (см. рис. 1г), были сильнее затронуты изменениями их повторяемо-

сти в последние три десятилетия по сравнению с восточной частью территории (см. рис. 1в). Это объясняется тем, что наблюдаемое зимнее потепление в более холодных регионах ВЕР на севере и востоке не оказало ощутимого влияния на увеличение числа дней с положительными температурами зимой. Установлено, что количество дней с положительными температурами зимой увеличилось на 3–6 дней в центре и на 7–11 дней на юге и западе территории (см. рис. 1в).

Как видно на рис. 2а, на равнине преобладало увеличение суммарного количества осадков за осень и зиму. Наибольший статистически значимый рост осенне-зимних осадков в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. отмечен на ее западе (на 10%) и на юго-востоке (до 18%). Увеличение количества осенне-зимних осадков до 6% наблюдалось на Кольском п-ове, в бассейне Печоры и на северо-востоке бассейна Камы. Значимым было также увеличение зимних осадков на западе и в центре ВЕР, не превысившее 10%. Увеличение осенне-зимних осадков на ВЕР произошло в основном за счет ощутимого роста их количества зимой: до 20% на северо-западе и западе равнины и на 30% на ее юго-востоке (рисунок не приводится). Закономерным следствием потепления зимой в последние десятилетия на ЕТР (см. рис. 1б) явилось увеличение доли жидких осадков на большей части равнины. Наиболее значительно на 10–20% жидкие осадки увеличились на западе равнины (рис. 2б), на той территории наблюдения устойчивого снежного покрова, где стало больше оттепелей (см. рис. 1в).

Поскольку ландшафт играет важную роль в накоплении снега, оценки изменений SWE в среднем за период 1991–2020 гг. по сравнению с климатической нормой различаются в лесу и в поле. Так, согласно полученным в поле маршрутным данным, в целом незначительное увеличение запаса воды в снеге наблюдалось севернее 58° с.ш. на 4–20% и восточнее 45° в.д. на 15–30% (рис. 2в). На остальной территории залегания снега отмечалось как увеличение запаса воды в снеге, так и его уменьшение (см. рис. 2в). В то же время, по данным аналогичных измерений, в лесу преобладало увеличение запаса воды в снеге (рис. 2г). Наиболее ярко выраженный значимый рост SWE отмечался в центре (на 25%) и на западе (на 20–35%) (см. рис. 2г). Обнаруженные отличия изменений запаса воды в снеге в поле и в лесу согласуются с выявленными в (Третий ..., 2022) противоположными тенденциями максимальной за зимний период высоты снежного покрова в аналогичных ландшафтах.

Отклик сезонного стока Дона на климатические изменения. С точки зрения оценки изменений рассмотренных выше климатических характеристик на ВЕР, бассейн Дона осенью, зимой

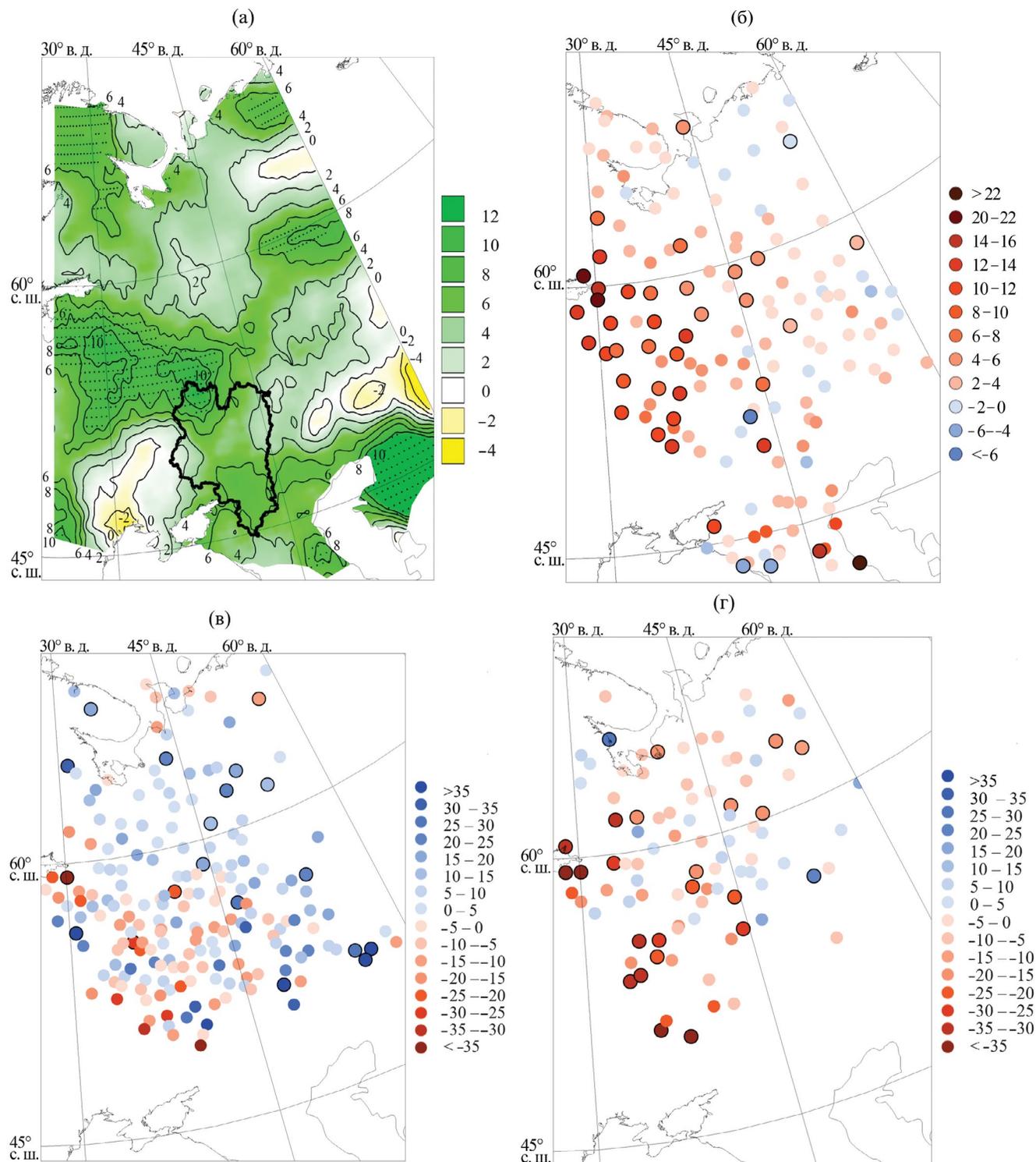


Рис. 2. Изменения суммарных осадков за осень и зиму (%) (а), доли жидких осадков в их общем количестве (%) в среднем за зимние месяцы в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. (б), наибольших значений SWE в поле (%) (в) и в лесу (%) (г) в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1966–1990 гг. Граница бассейна Дона на рис. 2а показана жирной линией черного цвета. Узлы сетки со статистически значимыми изменениями осадков на уровне 0.05 отмечены точками. Значимые изменения доли жидких осадков и SWE показаны кругами, обведенными черным цветом.

и весной в 1979–2020 гг. находился вне центра наибольших скоростей их изменений на территории России (Доклад ..., 2021). Современное потепление проявилось в бассейне Дона во все сезоны года в 1991–2020 гг. по сравнению с предыдущим тридцатилетием (табл. 1). В то же вре-

мя незначимое увеличение количества осадков в среднем по бассейну Дона наблюдалось во все сезоны, кроме лета (см. табл. 1). Наиболее сильный рост количества осенне-зимних осадков на 10% отмечен на севере бассейна (см. рис. 2а). Необходимо отметить, что наблюдаемое зимнее

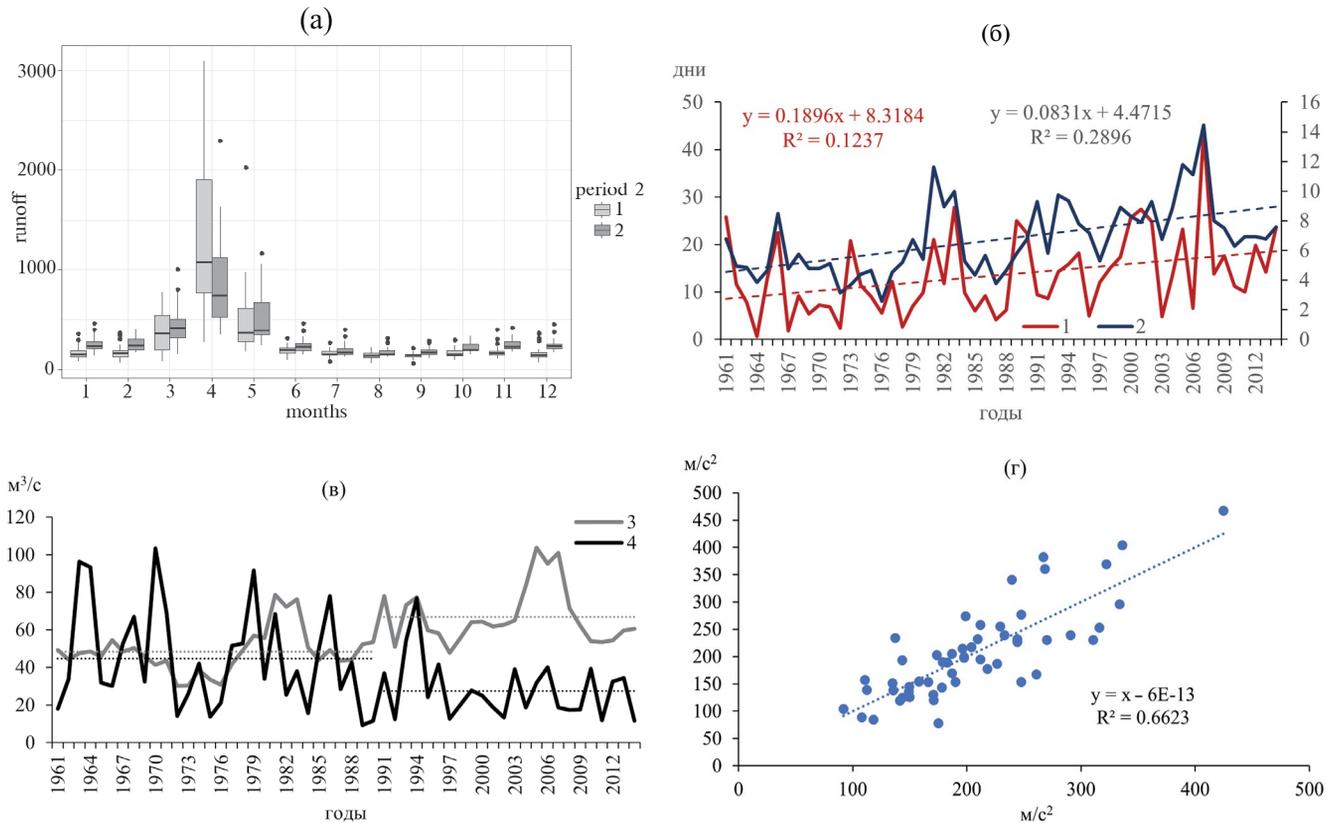


Рис. 3. Диаграмма размаха (а) расходов воды в створе Казанская (км³/год) по месяцам в период 1961–1990 гг. (1) и 1991–2014 гг. (2); многолетняя изменчивость числа дней со среднесуточной температурой >0°C (1) в среднем для метеостанций бассейна Дон до Казанской и стока (2) зимой (б); суммарный сток за осень, зиму и лето (3) и сток в апреле (4) (в); а также связь наблюдаемого и рассчитанного на основе метода пошаговой регрессии среднего расхода воды в январе в период 1961–2014 гг. (г). Линейные тренды на рис. 3б показаны пунктирными линиями, средние значения стока за период 1961–1990 гг. и 1991–2014 гг. на рис. 3в показаны точечными линиями.

потепление в бассейне Дона было более существенным по сравнению с незначительным повышением количества осадков осенью и зимой. Исходя из этого, можно предположить, что температурный фактор сыграл наиболее важную роль в изменении гидрологического режима реки. Для подтверждения (или опровержения) этого предположения попытаемся выявить наиболее важные климатические факторы, влияющие на зимний сток реки, и проанализируем их изменения.

Установлено, что наибольшие снегозапасы в бассейне Дона (рассчитанные по данным маршрутных снегосъемок, проведенных в феврале) снижались на 5–20% в лесу в среднем за 1991–2020 гг. по сравнению с предыдущим двадцатипятилетием (см. рис. 2г). Изменения наибольших снегозапасов в поле на территории бассейна Дона были разнонаправленными. В северной части бассейна на станции Павелец отмечено их слабое уменьшение. На юге бассейна на станции Калач, напротив, наблюдался значительный рост наибольших снегозапасов на 30% (см. рис. 2в). В работе (Титкова, 2019) отмечается, что, согласно данным дистанционного зондирования, на той же территории в пери-

од 1982–2016 гг. наблюдались однонаправленные тенденции снижения снегозапасов с декабря по март с увеличивающейся скоростью от 3 мм/10 лет в декабре до 14 мм/10 лет в марте.

Что же происходило с водным режимом Дона в 1961–2014 гг., его годовым и межнным стоком, стоком весеннего половодья? На фоне увеличения годового стока на 4.8% в период 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. произошло его внутригодовое перераспределение. Увеличение стока наблюдалось во все месяцы года (от наименьшего увеличения на 4.7% в мае до наибольшего роста на 55.7% в январе) кроме апреля, когда сток понизился на 37% (рис. 3а, табл. 1). Средний расход воды зимой в створе Казанская в период 1991–2014 гг. по сравнению с предыдущим тридцатилетием XX в. значимо вырос в 1.5 раза, а весной, напротив, отмечалось его уменьшение в 1.2 раза. Сокращение среднего за половодье (март–май) расхода воды произошло за счет существенного снижения среднего расхода воды в апреле. Доля зимнего стока в период 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. увеличилась с 14 до 20%, а доля стока половодья сократилась с 60 до 47%. Таким образом, можно говорить об увеличении зимнего стока в 1991–

Таблица 1. Изменения среднемесячных расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) в створе Казанская, а также изменения климата в бассейне Дона в 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Среднемесячные расходы воды в 1961–1990 гг.	164.7	174.4	366.3	1341.8	481.7	191.2	157.8	142.3	142.0	161.8	176.9	172.5
Изменения среднемесячных расходов воды (%) в 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.	55.7*	45.8*	22.1*	-37.0*	4.7	25.9*	22.7*	22.0*	26.4*	38.1*	39.6*	41.5*
Сезон	зима			весна			лето			осень		
Изменения температур ($^{\circ}\text{C}$) в 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.	1.6*			0.9*			1.0*			0.7*		
Изменения количества осадков (%) в 1991–2014 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.	6.1			7.6			-6.6			2.9		

Примечание. Статистически значимые изменения на уровне 0.05 отмечены *.

2014 гг. При этом, как уже было сказано выше, сток уменьшился в апреле и увеличился во все остальные месяцы (рис. 3в).

Как показано на рис. 3а, речной сток Дона в апреле в период 1991–2014 гг. по сравнению с базовым периодом 1961–1990 гг. сократился на 37%, а суммарный сток в остальные месяцы года (без весенних месяцев), напротив, вырос на 35%. При этом изменения стока в марте и в мае были незначительными (см. рис. 3а). Полученные результаты согласуются с выводами о внутригодовом перераспределении стока Дона в 1991–2009 гг. по сравнению с 1961–1990 гг., сделанными в работе (Дмитриева, 2011б). Графики межгодовой изменчивости стока Дона в апреле и суммарного стока за осень, зиму и лето, представленные на рис. 3г, показывают слабое отличие их средних величин в период 1961–1990 гг. и статистически значимые различия средних за период 1991–2014 гг. Каковы же могут быть причины различий сезонных изменений гидрологического водного режима реки в последние десятилетия?

Вопросы влияния осенних условий увлажнения, суммы положительных/отрицательных температур зимой и зимних осадков на сток Дона рассматривались в (Кучмент, 1980; Руководство ..., 1989; и др.). Осеннее увлажнение водосбора характеризуется влагозапасами в почве и запасами грунтовых вод зоны активного водообмена. Эти данные, как правило, ограничены, поэтому в качестве основного косвенного показателя предзимнего увлажнения принимают во внимание осенние осадки (в сентябре–ноябре) и температуру воздуха как показатель испарения в эти периоды. Оценка корреляционной связи зимнего стока в бассейне Дона до Казанской с осадками показала, что он наиболее тесно связан с осенним и зимним увлажнением. По нашим расчетам наибольшая доля (30.7%) объясненной дисперсии стока Дона зимой в период 1961–2014 гг. наблюдалась за счет вариаций

суммарных осадков за осень и зиму. Их вклад уменьшился с 34.7% в 1961–1990 гг. до 19.3% в 1991–2014 гг., что указывает на увеличение роли температурного фактора.

Анализ результатов расчетов свидетельствует о том, что основное влияние на формирование речного стока зимой в период 1991–2014 гг. оказывали оттепели, с которыми ассоциируются положительные температуры зимой. Согласованность их изменений подтверждается высокими коэффициентами корреляции между временными рядами стока и числа дней с положительными температурами в среднем за зимние месяцы (табл. 2). В декабре в период 1961–2014 гг. положительные температуры воздуха не оказывали заметного влияния на декабрьский сток. Наиболее тесная связь между обоими рассмотренными характеристиками наблюдалась в январе (см. табл. 2). 23% изменчивости стока Дона в январе в 1961–1990 гг. формировалось под влиянием январских оттепелей, а их вклад в колебания стока в 1991–2014 гг. увеличился вдвое и составлял уже 47%. Оттепели в январе в 1991–2014 гг. оказывали наибольшее значимое влияние на сток в феврале, а также на сток в среднем за зиму (см. табл. 2, рис. 3в). Их роль в формировании зимнего стока в 1991–2014 гг. возросла по данным всех рассмотренных метеостанций (см. табл. 2). При этом на сток в феврале более ошутимое влияние оказывали январские, а не февральские оттепели. Это может быть связано с тем, что в феврале растаявшая в период оттепелей вода не сразу попадает в сток из-за более активного, чем в январе просачивания влаги в почву. Отметим, что высказанное предположение требует дополнительного анализа.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что увеличение среднего числа дней с положительными температурами от трех дней в период 1961–1990 гг. до пяти дней в 1991–2014 гг., выявленное на метеостанциях бассейна

Таблица 2. Коэффициенты корреляции стока на станции Казанская и числа дней со среднесуточной температурой воздуха $>0^{\circ}\text{C}$ ($T > 0$) на метеостанциях бассейна Дона в зимние месяцы в периоды 1961–2014, 1961–1990 и 1991–2014 гг. Результаты для декабря не приведены ввиду их статистической незначимости

Индекс	27823	34123	34139	34026	34247
Название	Павелец	Воронеж	Каменная Степь	Конь-Колодезь	Калач
Широта	53.47	51.42	51.03	52.15	50.42
Долгота	39.15	39.13	40.42	39.15	41.05
Между стоком января и числом дней с $T > 0$ в январе					
1961–2014 гг.	0.6*	0.64*	0.66*	0.64*	0.64*
1961–1990 гг.	0.28	0.45	0.61*	0.41*	0.51*
1991–2014 гг.	0.7*	0.68*	0.63*	0.71*	0.64*
Между стоком в феврале и числом дней с $T > 0$ в январе					
1961–2014 гг.	0.56*	0.64*	0.62*	0.63*	0.65*
1961–1990 гг.	0.36	0.54*	0.6*	0.49*	0.59*
1991–2014 гг.	0.64*	0.65*	0.58*	0.67*	0.62*
Между стоком в феврале и числом дней с $T > 0$ в феврале					
1961–2014 гг.	0.32	0.37	0.41	0.34	0.43
1961–1990 гг.	0.21	0.31	0.40	0.28	0.29
1991–2014 гг.	0.28	0.24	0.28	0.23	0.43
Между стоком в среднем за зиму и числом дней с $T > 0$ в январе					
1961–2014 гг.	0.56*	0.65*	0.65*	0.64*	0.65*
1961–1990 гг.	0.24	0.49	0.59*	0.45	0.53*
1991–2014 гг.	0.71*	0.71*	0.65*	0.73*	0.67*
Между стоком в среднем за зиму и числом дней с $T > 0$ в феврале					
1961–2014 гг.	0.59*	0.59*	0.69*	0.56*	0.64*
1961–1990 гг.	0.42	0.53*	0.69*	0.42	0.59*
1991–2014 гг.	0.67*	0.56*	0.56*	0.57*	0.57*

Примечание. Статистически значимые на уровне 0.05 коэффициенты корреляции отмечены *.

Дона в январе, было достаточным для интенсивного таяния снега и формирования талого стока.

Поскольку в январе отмечались наиболее заметные изменения стока, то далее мы сфокусировались на анализе влияния климатических факторов на сток в этом месяце. Количественные оценки влияния изменений климата на сток Дона в январе, полученные с помощью пошаговой множественной регрессии, показали, что 66.2% его изменчивости в период 1961–2014 гг. объясняется изменениями температуры воздуха и атмосферных осадков (см. рис. 3г). Как следует из табл. 3, почти половина вариаций стока в январе, в период 1961–2014 гг. происходила за счет оттепелей. В то же время вклад суммарных осенне-зимних осадков в изменчивость стока составил чуть более 12%, а жидких осадков – менее 8%.

Описанные выше результаты согласуются с выводами других исследователей о повышении роли оттепелей в формировании зимнего и ве-

сенного стока рек ЕТР в 1970–2000 гг. (Калужный, Лавров, 2012; Лавров, Калужный, 2012).

Отметим, что последнее десятилетие XX в. ассоциируется с быстрым зимним потеплением на ВЕР и увеличением не только общего числа дней с оттепелями, но и числа перерывов в залегании снежного покрова, наибольшего на юге ЕТР (до 20–25 дней по сравнению с предыдущим тридцатилетием) (Кренке и др., 2012). В (Дмитриева и др., 2022) делается важный вывод о том, что в современном климате возрастающая доля жидких осадков в зимний период на Дону приводит к увеличению их стокообразующей способности наряду с тем, что зимний сток стал формироваться в большей степени за счет зимних паводков во время оттепелей. В работе (Киреева, Фролова, 2013) было показано, что увеличение числа оттепелей приводит к невыраженности начала половодья, формируемого в результате таяния снежного покрова. В той же работе подчеркивается, что максимальное сокращение стока половодья наблюдается в верховьях Дона.

Таблица 3. Параметры пошаговой множественной регрессии стока в январе в период 1961–2014 гг.

Предиктор регрессионной модели	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	Число степеней свободы t (49)	Уровень значимости (p -value)	Коэффициент детерминации (R^2), %
Константа	-29.44	40.6	-0.7	0.47	
Число дней $T > 0$ в январе	12.9	1.8	7.0	0.00000001	43.1
Суммарные осадки за осень и зиму	0.6	0.2	3.5	0.001	12.2
Количество жидких осадков в декабре	2.6	0.8	3.2	0.003	7.8
Число дней $T > 0$ в декабре	3.5	1.6	2.1	0.04	3.2

Авторы (Джамалов и др., 2012) обратили внимание на то, что гидрограф рек бассейна Дона во время половодья в начале текущего столетия по сравнению с первой половиной XX в. изменился и стал характеризоваться пологой и распластанной волной с 3–4 максимумами с меньшими на порядок значениями.

Результаты анализа изменчивости разности суммы осадков за декабрь–январь и запасов воды в снеге по данным маршрутных снегоуборочных машин на первую пентаду февраля, а также на первую декаду февраля на метеостанциях бассейна Дона показали, что в период начиная с 1990-х годов происходил заметный рост объема воды (рис. 4а, б), который приводил к увеличению расходов воды в течение декабря–января. Как видно на рис. 4а, 4б, этот объем воды уменьшался в последние два десятилетия: с конца 2000-х годов на метеостанциях Калач и Валуйки по данным снегозапасов на первую пентаду и первую декаду февраля соответственно, а также с конца 2010-х годов на метеостанции Павелец по данным снегозапасов на первую декаду февраля. Полученные результаты, которые следует

считать предварительными и требующими последующего уточнения, косвенно указывают на то, что увеличение таяния снега в бассейне Дона с 1990-х до середины 2000-х годов сыграло важную роль в возрастании его зимнего стока, показанного на рис. 3б.

Сценарные изменения характеристик оттепелей, влияющих на зимний сток рек. В предположении продолжения современного потепления на ВЕР, анализ прогнозируемого смещения границ территории интенсивного таяния снега и ощущаемого пополнения талых вод в бассейнах крупных рек на ВЕР с использованием результатов климатического моделирования бесспорно представляет научный интерес. Мы исходили из выявленной наибольшей тесноты связи стока с числом дней с положительной температурой воздуха в зимние месяцы, а также из того, что температура воздуха воспроизводится климатическими моделями наиболее надежно. Согласно ансамблевым оценкам моделей климата к середине XXI в. в бассейне Дона возможно продолжение роста повторяемости дней с оттепелями (рис. 5), а следовательно, и увеличения за счет этого зимнего стока, обу-

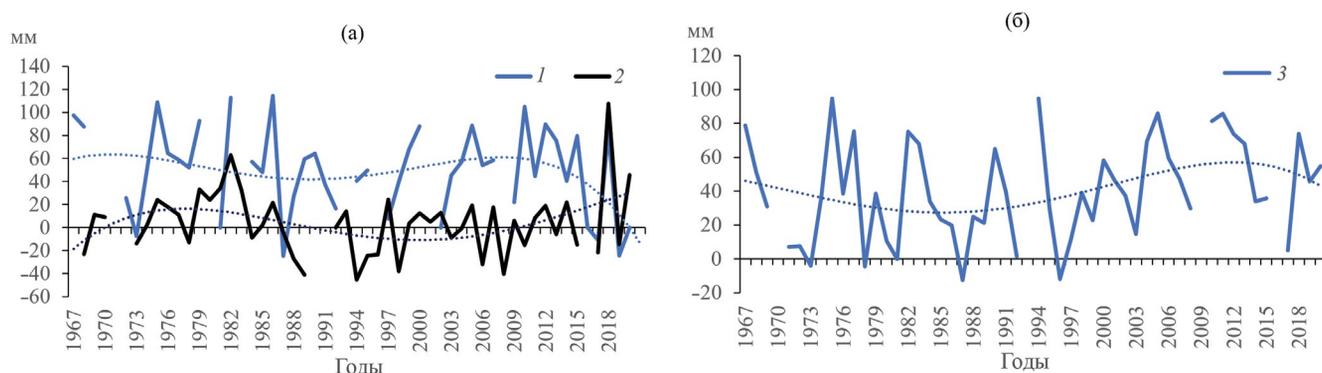


Рис. 4. Многолетняя изменчивость разности суммарных осадков за декабрь–январь и запасов воды в снеге в период 1967–2020 гг., измеренных в поле в окрестностях метеостанций Калач (1) на первую пентаду февраля и Павелец (2) на первую декаду февраля (а), а также в лесу в окрестностях метеостанции Валуйки (3) на первую декаду февраля (б). На рис. 4а и б одиннадцатилетние скользящие средние показаны полужирными линиями, полиномиальные тренды 4-й степени – пунктирными линиями.

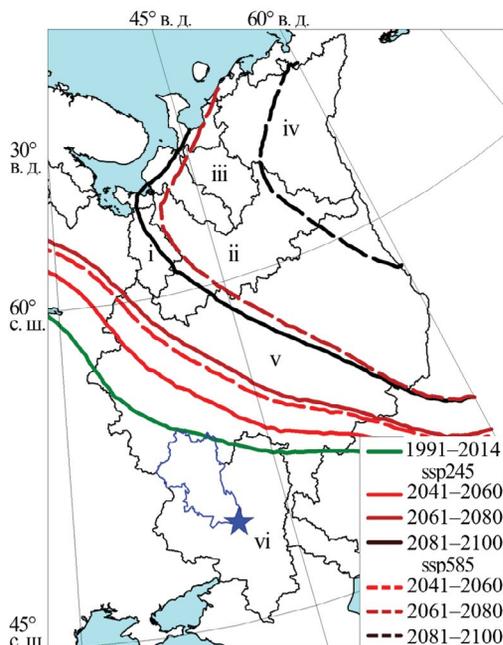


Рис. 5. Пространственное распределение изолинии числа дней с положительной температурой воздуха в январе со значением, равным пяти дням, в среднем за периоды 1991–2014, 2041–2060, 2061–2080 и 2081–2100 гг. в бассейнах рр. Онега (i), Северная Двина (ii), Мезень (iii), Печора (iv), Волга (v), Дон (vi) согласно данным ансамбля климатических моделей проекта CMIP6. Бассейн Дона обведен линией синего цвета, гидрологический пост Казанская отображен звездочкой.

словленного снеготаянием, но при достаточных для этого запасах воды в снежном покрове. Как показано на рис. 5, модельные прогнозы на XXI в. предполагают продолжение перераспределения сезонного стока в бассейне Дона, а стало быть, дальнейшее расплывание гидрографа весеннего стока за счет таяния снега зимой. При этом наиболее сильные изменения ожидаются во второй половине текущего столетия (см. рис. 5).

Предположительно, область интенсивного снеготаяния в середине зимы, ошутимо пополняющего талые воды, может продвигаться на территорию бассейна Волги и в период 2041–2060 гг. охватить юго-запад бассейна согласно сценарию SSP245, а также почти всю его юго-западную половину в тот же период по сценарию SSP585 и в 2061–2080 гг. по SSP245. Ожидается, что интенсивное снеготаяние будет наблюдаться на юго-востоке бассейна Северной Двины, почти на всей территории бассейна Онеги и большей части территории бассейна Волги в 2081–2100 гг. по сценарию SSP245 и в 2061–2080 гг. по сценарию SSP585. Сценарий SSP585 предполагает, что в 2081–2100 гг. практически во всем бассейне Волги, а также Северной Двины будет происходить интенсивное снеготаяние в январе. Вместе с тем, анало-

гичные изменения ожидаются в бассейне Мезени и на северо-востоке бассейна Печоры только в 2081–2100 гг. по сценарию SSP585. Отметим, что оценки будущих изменений речного стока зимой нуждаются в дополнительном исследовании, поскольку они получены без учета важных для снеготаяния характеристик речных бассейнов, прежде всего, типов ландшафтов, а также без оценки воспроизведения параметров снежного покрова климатическими моделями в середине-конце XXI в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено значимое потепление зимой на Восточно-Европейской равнине в среднем на 1,8°C в период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. Несмотря на увеличение скорости потепления с юго-востока на северо-запад равнины, наиболее сильному росту повторяемости числа дней с положительной температурой воздуха (до 11 дней) подверглись регионы с более теплыми зимами на юге и западе равнины с наиболее частым наблюдением зимних оттепелей по сравнению с восточной частью территории. В то же время на ВЕР преобладало увеличение количества суммарных осадков за осень и зиму с их наибольшим ростом до 6% на Кольском п-ове, в бассейне Печоры и на северо-востоке бассейна Камы, и до 10% на западе и в центре ВЕР. Доля жидких осадков возросла в их общем количестве за зиму, наибольший рост на западе территории исследования не превысил 20%. Обнаружено, что в лесу в целом преобладало уменьшение запаса воды в снеге (до 20–35% в центре и на юго-западе). На территории залегания снега в поле отмечалось его увеличение в северо-восточной части равнины до 20–30%, а его уменьшение в юго-западной части в среднем не превысило 10% и было незначимым.

Потепление в бассейне Дона в среднем за последние 30 лет по сравнению с нормой было значимым во все сезоны, наиболее сильное потепление на 1,6°C отмечено зимой. Слабо выраженное увеличение количества осадков в среднем по бассейну, не превышающее 8%, обнаружено во все сезоны кроме лета. Изменения наибольших снегозапасов в бассейне были разнонаправленными на севере и на юге.

Показано, что внутригодовое распределение стока Дона претерпело заметные изменения в 1991–2014 гг. по сравнению с базовым периодом (1961–1990 гг.), изменилось также соотношение меженного стока и стока половодья. В то время как средний годовой сток реки увеличился всего на 4,8%, его зимний сток увеличился наиболее значительно (особенно в январе на 55,7%), а сток половодья напротив уменьшился (в апреле на 37%). Увеличение стока наблюдалось во все

месяцы года, кроме апреля. Существенное снижение стока в апреле обусловило сокращение стока за половодье.

Многолетняя изменчивость зимнего стока Дона во многом определялась изменениями количества оттепелей, а также осенним и зимним увлажнением. Показано, что наиболее тесная корреляционная связь наблюдалась между речным стоком и числом дней со среднесуточной температурой воздуха $>0^{\circ}\text{C}$ в январе в период 1991–2014 гг. При этом вклад увеличившегося числа дней с оттепелями за зимний период в 1991–2014 гг. по сравнению с базовым периодом в изменчивость зимнего стока вырос в два раза. Напротив, вклад атмосферных осадков за осенне-зимний период, который составлял в 1961–1990 гг. 35%, в 1991–2014 гг. уменьшился почти в два раза. Оценка влияния исследуемых климатических факторов на сток Дона в январе на основе метода пошаговой регрессии показала, что 66% его многолетней изменчивости за 1961–2014 гг. объясняется изменениями температур в зимние месяцы и осадков в осенне-зимний период. Из них практически половина вариаций стока в январе в весь исследуемый период происходила за счет оттепелей, а почти 20% его изменчивости было обусловлено изменениями осадков.

Значительный рост в 1.5–2 раза числа дней с положительными температурами воздуха на метеостанциях бассейна Дона за последние тридцать лет по сравнению с базовым тридцатилетием привел к интенсивному таянию снега и пополнению стока Дона за счет талой воды. Результаты анализа изменений разности суммарных осадков за декабрь-январь и запасов воды в снеге на первую пентаду февраля в бассейне Дона также могут свидетельствовать об увеличении снеготаяния зимой и росте зимнего стока, начиная с 1990-х годов. Анализ полученных результатов показал, что сток в апреле в период 1991–2014 гг. уменьшился за счет изъятия из него доли талой воды, сформированной во время более частых и более интенсивных зимних оттепелей. Это обусловлено существенным ростом числа дней с положительными температурами воздуха и, в меньшей степени, ростом жидких осадков.

Сохранение темпов современного потепления на ВЕР может привести в XXI в. к дальнейшему усилению роли оттепелей в увеличении речного стока зимой и дальнейшему снижению стока половодья, как в бассейне Дона, так и в бассейнах других рек на ВЕР. Согласно проекциям климатических моделей проекта CMIP6, область интенсивного снеготаяния будет вероятно распространяться на юго-запад бассейна Волги в период 2041–2060 гг. согласно сценарию SSP245 (сценарий умеренного воз-

действия на климат), а также в центральную часть этого бассейна: в 2061–2080 гг. по сценарию SSP245 и в 2041–2060 гг. по сценарию SSP585 (сценарий агрессивного антропогенного воздействия на климат). Предполагается, что наиболее сильные изменения повторяемости зимних оттепелей, приводящих к активному снеготаянию, произойдут во второй половине XXI в. В период 2061–2080 гг. по сценарию SSP585 и в 2081–2100 гг. по сценарию SSP245 они могут затронуть не только северо-западную часть бассейна Волги, но и бассейны рек в центральной части Европейского севера России. В период 2081–2100 гг. ожидается практически полный охват ВЕР оттепелями зимой, количество которых ассоциируется с интенсивным снеготаянием.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование изменений климата на Восточно-Европейской равнине, а также в бассейне Дона проведено в рамках темы государственного задания Института географии РАН ААА-А-А19-1021051403088-5 (FMWS-2024-0001). Реакция стока Дона на климатические изменения изучалась в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0007 (1021051703468-8). Прогностические модельные оценки изменений температурных характеристик зимой, в том числе, на Европейском севере России, осуществлялись при поддержке Российского научного фонда (проект 23-47-00104).

FUNDING

The study of climate change on the East European Plain, as well as in the Don basin, was carried out within the framework of the state assignment for the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences АААА-А19-1021051403088-5 (FMWS-2024-0001). The response of the Don runoff to climate change was studied within the framework of the state assignment for the Institute of Geography RAS of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0007 (1021051703468-8). Predictive model assessments of changes in temperature characteristics in winter, including in the European North of Russia, were carried out with the support of the Russian Science Foundation (project no. 23-47-00104).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 598 с.
 Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Ка-
 шутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сце-
 нарные изменения речного стока в бассейнах
 крупнейших рек России: Ч. 2. Бассейны рек Волги
 и Дона. М.: МАКС Пресс, 2014. 216 с.

- Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Какутина Е.А.* Современные и сценарные прогнозы изменения речного стока в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 913–923.
- Джамалов Р.Г., Телегина Е.А., Фролова Н.Л.* Изменение зимнего стока рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 581.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б.* Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 573–584.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И., Киреева М.Б., Игонина М.И.* Формирование современных ресурсов поверхностных и подземных вод Европейской части России // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 623–639.
- Дмитриева В.А.* Внутригодовая и многолетняя динамика сезонного речного стока бассейна Верхнего Дона // Аридные экосистемы. 2011а. Т. 17. № 2 (47). С. 23–32.
- Дмитриева В.А.* Водные ресурсы в бассейне Верхнего и Среднего Дона в современный период // Изв. РАН. Сер. геогр. 2011б. № 5. С. 74–84.
- Дмитриева В.А., Сушков А.И., Закусилов В.П.* Климатическая обусловленность современных гидроэкологических процессов в речных потоках бассейна Верхнего Дона // Вестн. ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2022. № 2. С. 118–127.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
- Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Основные физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях потепления климата // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 68–81.
- Катцов В.М., Говоркова В.А.* Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и среднегодового стока на территории России: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Тр. ГГО. 2013. № 569. С. 75–97.
- Киреева М.Б., Фролова Н.Л.* Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России. 2013. № 1. С. 60–76.
- Кренке А.Н., Черенкова Е.А., Чернавская М.М.* Устойчивость залегания снежного покрова на территории России в связи с изменением климата // Лёд и снег. 2012. № 1 (117). С. 29–37.
- Кучмент Л.С.* Модели процесса формирования речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 143 с.
- Лавров С.А., Калюжный И.Л.* Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях изменения климата // Тр. Всероссийской научной конференции “Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока”. Москва, 10–12 апреля 2012 г. С. 432–441.
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Латиф М., Рекнер Э.* Связь аномалий климата Евразии и Северной Атлантики с естественными вариациями Атлантической термохалинной циркуляции по долгопериодным модельным расчетам // ДАН. 2008. Т. 419. № 5. С. 687–690.
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек, озер и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 358 с.
- Титкова Т.Б.* Изменение климатических условий формирования зимнего стока в бассейне верхнего Дона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 147–157.
- Третий оценочный докл. об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
- 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. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2012. № 565. С. 165–187.
- Черенкова Е.А., Семенов В.А.* Связь зимних осадков на территории Европы с изменениями ледовитости Арктического бассейна, температуры океана и атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 38–52.
- Alfieri L., Burek P., Feyen L., Forzieri G.* Global warming increases the frequency of river floods in Europe // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2015. Vol. 19. P. 2247–2260.
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P.* Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // Nature. 2005. Vol. 438. P. 303–309.
- Barredo J.I.* Major flood disasters in Europe: 1950–2005 // Nat Hazards. 2007. Vol. 42. P. 125–148.
- Blöschl G., et al.* Changing climate shifts timing of European floods // Science. 2017. Vol. 357. P. 588–590.
- Christensen J.H., Christensen O.B.* A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century // Clim. Change. 2007. Vol. 81. P. 7–30.
- Dankers R., Feyen L.* Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high resolution climate simulations // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. Art. D19105.
- Dankers R., Feyen L.* Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios // J. of Geophys. Res. 2009. Vol. 114. P. 1–16.
- Engel H.* The flood events of 1993/1994 and 1995 in the Rhine River basin. Proceedings of the Conference held at Anaheim, California, June 1996. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports, 1997. № 239. P. 21–32.
- Frolova N., Agafonova S., Nesterenko D.* Water and ice regimes of the rivers of European Russia under climate change. Hydro-climatology: Variability and Change. Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011. IAHS Publ. 2011. № 344. P. 63–68.

- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusarov A.V. Water flow changes in the Don river (European Russia) during 1891–2019 // *Geography, Environment, Sustainability*. 2023. Vol. 2. № 16. P. 6–17.
- Harris I., Osborn T.J., Jones P., et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // *Sci Data*. 2020. Vol. 7. Art. 109.
- Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation // *Science*. 1995. Vol. 269. P. 676–679.
- IPCC, 2023. Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee, J. Romero (Eds.)*. Geneva, Switzerland, 2023. P. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation // *Geophysical Res. Lett.* 2006. Vol. 33. Art. L17706.
- Kundzewicz Z., Pinskiwar I., Brakenridge R. Large floods in Europe, 1985–2009 // *Hydrological Sciences J.* 2013. Vol. 58. P. 1–7.
- Lehner B., Döll P., Alcamo J., Henrichs T., Kaspar F. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis // *Climatic Change*. 2006. Vol. 75. P. 273–299.
- O'Neil B.C., et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9. № 9. P. 3461–3482.
- Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. Art. D21111.
- Sarauskiene D., Kriauciuniene J., Reihan A., Klavins M. Flood pattern changes in the rivers of the Baltic countries // *J. Environ. Eng. Landsc.* 2015. Vol. 23. P. 28–38.
- Semenov V.A., Latif M., Dommenget D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature // *J. Climate*. 2010. Vol. 23. P. 5668–5677.
- Sutton R.T., Dong B. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s // *Nat. Geoscience*. 2012. Vol. 5. P. 788–792.
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vital activities of the human population // *Geography, Environment, Sustainability*. 2017. Vol. 10. № 4. P. 69–82.

Observed and Expected Climate Changes on the East European Plain and Their Influence on River Flow (Case Study of the Don River)

E. A. Cherenkova^{a, b, *}, A. G. Georgiadi^a, A. N. Zolotokrylin^a, and E. A. Kashutina^a

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

^b*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: cherenkova@igras.ru*

The paper examines modern climate change over the East European Plain, and the response of river runoff to them in the Don basin. A significant warming of 1.8°C on average in winter at the level during the 1991–2020 period compared to 1961–1990 led to an increase in the number of days with positive air temperatures. There was an increase in the amount of total precipitation in autumn and winter, as well as the share of liquid precipitation in the winter season, with the greatest increase in the west and center of the study area. In the Don basin during the same period, the greatest warming in winter by 1.6°C was observed compared to other seasons and a slight increase in precipitation in all seasons except summer. There has been a noticeable intra-annual redistribution of the Don runoff since the 1990s compared to 1961–1990, which has changed the ratio of low-water vs high-water runoff. A significant increase in runoff was observed in all months of the year except April and May; in April it decreased significantly. The largest increase in runoff by 55.7% was observed in January. It was showed that almost half of the variations in Don runoff in January were due to thaws, and about 20% of its variability was due to changes in precipitation in autumn and winter, including liquid precipitation in December. The contribution of thaws in the formation of winter runoff, the frequency of which has increased 2.6 times over the past thirty years compared to the previous period, has doubled, and the influence of total precipitation, on the contrary, has decreased. Projections of climate models in the 21st century suggest a gradual advance of the border of the observation area of winter thaws to the northeast of the plain, leading to active snowmelt, an increase in river flow in winter and a decrease in floods. According to scenarios of moderate and aggressive anthropogenic impact on climate in the period 2061–2100, the designated boundaries may shift not only to the northwestern part of the Volga basin, but to the river basins of the European north of Russia as well.

Keywords: global warming, air temperature, precipitation, river runoff, thaws, climate models, East European Plain

REFERENCES

- Alfieri L., Burek P., Feyen L., Forzieri G. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2015, vol. 19, pp. 2247–2260.
- Barredo J.I. Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Nat. Hazards*, 2007, vol. 42, pp. 125–148.
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 2005, vol. 438, pp. 303–309.
- Blöschl G., et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 2017, vol. 357, pp. 588–590.
- Cherenkova E.A., Kononova N.K. Analysis of dangerous atmospheric droughts of 1972 and 2010 and macrocirculation conditions of their formation on the territory of the European part of Russia. *Tr. Glavn. Geofiz. Observ. Voeikova*, 2012, no. 565, pp. 165–187. (In Russ.).
- Cherenkova E.A., Semenov V.A. A link between winter precipitation in Europe and the Arctic Sea ice, sea surface temperature, and atmospheric circulation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, pp. 238–247. <https://doi.org/10.3103/S1068373917040045>
- Christensen J.H., Christensen O.B. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change*, 2007, vol. 81, pp. 7–30.
- Dankers R., Feyen L. Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high resolution climate simulations. *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, art. D19105.
- Dankers R., Feyen L. Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. *J. Geoph. Res.*, 2009, vol. 114, pp. 1–16.
- Dmitrieva V.A. Intraannual and multiyear dynamics of seasonal river runoff. *Arid Ekosys.*, 2011a, vol. 17, no. 2, pp. 87–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2079096111020028>
- Dmitrieva V.A. Water resources in the basin of Upper and Middle Don in the modern climate. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2011b, no. 5, pp. 74–84. (In Russ.).
- Dmitrieva V.A., Sushkov A.I., Zakusilov V.P. Climatic conditionality of modern hydroecological processes in river flows of the Upper Don basin. *Vestn. VSU, Ser.: Geogr., Geoekol.*, 2022, no. 2, pp. 118–127. (In Russ.).
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* [Report on Climate Features in the Russian Federation for 2020]. Moscow: Rosgidromet, 2021. 104 p.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River Basin. *Water Resour.*, 2013, vol. 40, pp. 573–584. <https://doi.org/10.1134/S0097807813060043>
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Krichevets G.N., et al. The formation of present-day resources of surface and subsurface waters in European Russia. *Water Resour.*, 2012, vol. 39, pp. 623–639. <https://doi.org/10.1134/S0097807812060036>
- Dzhamalov R.G., Telegina E.A., Frolova N.L. Winter runoff variations in European Russia. *Water Resour.*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 758–765. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0097807815060032>
- Engel H. The flood events of 1993/1994 and 1995 in the Rhine River basin. In *Proc. of the conf. held at Anaheim, California, June 1996*. IAHS Publ., 1997, pp. 21–32.
- Frolova N., Agafonova S., Nesterenko D. Water and ice regimes of the rivers of European Russia under climate change. Hydro-climatology: Variability and Change. In *Proc. of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011*. IAHS Publ., 2011, pp. 63–68.
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsennarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii: Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* [Modern and Scenario Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don Rivers]. Moscow: “Max Press” Publ., 2014. 216 p.
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusarov A.V. Water flow changes in the Don River (European Russia) during 1891–2019. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2023, vol. 2, no. 16, pp. 6–17.
- Geordiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and scenario changes in river runoff in the Don basin. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 913–923. <https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Harris I., Osborn T.J., Jones P., et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data*, 2020, vol. 7, art. 109.
- Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation. *Science*, 1995, vol. 269, pp. 676–679.
- IPCC. *Sections. In Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Lee H., Romero J., Eds. Geneva: IPCC, 2023, pp. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A. Basic physical processes and regularities of winter and spring river runoff formation under climate warming conditions. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, pp. 47–56. <https://doi.org/10.3103/S1068373912010074>
- Kattsov V.M., Govorkova V.A. Expected changes in surface air temperature, precipitation and average annual runoff on the territory of Russia: results of calculations using the ensemble of global climate models (CMIP5). *Tr. GGO*, 2013, no. 569, pp. 75–97. (In Russ.).
- Kireeva M.B., Frolova N.L. Modern features of the spring flood of rivers in the Don basin. *Vodn. Khoz. Ross.*, 2013, no. 1, pp. 60–76. (In Russ.).
- Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geoph. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, art. L17706.

- Krenke A.N., Cherenkova E.A., Chernavskaya M.M. Stability of snow cover in Russia in connection with climate change. *Led Sneg*, 2012, no. 1, pp. 29–37. (In Russ.).
- Kuchment L.S. *Modeli protsessa formirovaniya rechnogo stoka* [Models of the River Flow Formation Process]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 143 p.
- Kundzewicz Z., Pinskiwar I., Brakenridge R. Large floods in Europe, 1985–2009. *Hydrolog. Sci. J.*, 2013, vol. 58, pp. 1–7.
- Lavrov S.A., Kalyuzhny I.L. Physical processes and patterns of formation of winter and spring river runoff under climate change conditions. In *Tr. Vseross. Nauch. Konf. "Sovremennyye problemy stokhasticheskoi gidrologii i regulirovaniya stoka"*, Moskva, 10–12 aprelya 2012 g. [Proc. of the All-Russian Sci. Conf. "Modern Problems of Stochastic Hydrology and Flow Regulation", Moscow, April 10–12]. Moscow, 2012, pp. 432–441. (In Russ.).
- Lehner B., Döll P., Alcamo J., Henrichs T., Kaspar F. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Clim. Change*, 2006, vol. 75, pp. 273–299.
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.C., et al. Connection between Eurasian and North Atlantic climate anomalies and natural variations in the Atlantic thermohaline circulation based on long-term model calculations. *Dokl. Earth Sci.*, 2008, vol. 419, pp. 502–505. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08030331>
- O'Neil B.C., et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 2016, vol. 9, no. 9, pp. 3461–3482.
- Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara Sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, art. D21111.
- Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek, ozer i vodokhranilishch* [Guide to Hydrological Forecasts. Vol. 1. Long-Term Forecasts of Elements of the Water Regime of Rivers, Lakes and Reservoirs]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 358 p.
- Sarauskiene D., Kriauciuniene J., Reihan A., Klavins M. Flood pattern changes in the rivers of the Baltic countries. *J. Environ. Eng. Landsc.*, 2015, vol. 23, pp. 28–38.
- Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. *J. Climate*, 2010, vol. 23, pp. 5668–5677.
- Sutton R.T., Dong B. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s. *Nat. Geosci.*, 2012, vol. 5, pp. 788–792.
- Titkova T.B. Change in climatic conditions of winter runoff formation in the Upper Don basin revealed by satellite and ground data. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 147–157. (In Russ.).
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Kattsov V.M., Ed. St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii, 2022. 676 p.
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg: GGI, 2008. 598 p.
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vital activities of the human population. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 69–82.