

Оригинальная статья

УДК 502/504: 556.53.124

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-117-127

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНОГО, СНЕЖНОГО И ЛЕДОВОГО РЕЖИМОВ В БАССЕЙНЕ МАЛОЙ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В БУДУЩЕМ

ГЕОРГИЕВСКИЙ МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ^{✉1}, канд. географических наук, руководитель отдела подготовки кадров
mgeorgievsky@hotmail.com

ГОРОШКОВА НАТАЛИЯ ИВАНОВНА^{✉1}, канд. техн. наук., старший научный сотрудник
goroshnat@yandex.ru

ХОМЯКОВА ВИКТОРИЯ АНДРЕЕВНА², студентка 1-го курса магистратуры
curcuma162@gmail.com

СТРИЖЕНОК АНАСТАСИЯ ВЛАДИМИРОВНА¹, младший научный сотрудник
anastasiastrizhenok@mail.ru

¹ Государственный гидрологический институт; 199004, г. Санкт-Петербург 2-я линия В.О., 23, Россия

² Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета; 199034, Санкт-Петербург, 10-я линия Васильевского острова, 31-33, Россия

В статье представлены исследования влияния изменений климата на основные характеристики ледовых явлений и снежного покрова, а также водного режима рек в бассейне Малой Северной Двины, происходящих в исследуемом бассейне в последние десятилетия. Полученные результаты демонстрируют связь между климатическими изменениями, происходящими в бассейне, и изменениями основных характеристик формирования снежного покрова, речного льда и стока. В последнее время в изучаемом бассейне наблюдается значительное потепление климата, в результате чего зима здесь становится теплее и короче. Увеличивается количество зимних осадков и оттепелей. Потепление климата напрямую влияет на продолжительность залегания снежного покрова, которая уменьшается ввиду как более позднего формирования, так и более раннего стаивания снега. В то же время наблюдается незначительная тенденция уменьшения годовых значений максимального запаса воды в снеге, что может быть результатом увеличения количества оттепелей в зимний период, когда часть снежного покрова стаивает, пополняя зимний речной сток. Анализ основных характеристик ледового покрова на реках исследуемого бассейна показывает, что они изменяются аналогично изменениям снежного покрова: происходит сокращение периода ледостава вследствие его более позднего образования и более раннего полного разрушения. Максимальная толщина льда на реках бассейна также имеет тенденцию уменьшения. В бассейне Малой Северной Двины наблюдается рост зимнего и уменьшение весеннего стоков. В заключительной части статьи представлены прогнозные оценки изменений наблюдаемых тенденций в будущем на основе данных проекта СМIP5.

Ключевые слова: зимний речной сток, климатические изменения, ледовые явления, максимальные влагозапасы, прогнозируемые тенденции в будущем, речной лед, Северная Двина, снежный покров

Формат цитирования: Георгиевский М.В., Горошкова Н.И., Хомякова В.А., Стриженок А.В. Оценка изменений характеристик водного, снежного и ледового режимов в бассейне Малой Северной Двины в современных условиях и их возможные изменения в будущем // Природообустройство. – 2021. – № 3. – С. 117-127. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-117-127.

© Георгиевский М.В., Горошкова Н.И., Хомякова В.А., Стриженок А.В., 2021

Scientific article

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE CHARACTERISTICS OF THE WATER, SNOW AND ICE REGIMES IN THE BASINS OF THE SMALL NORTHERN DVINA RIVER UNDER MODERN CONDITIONS AND THEIR POSSIBLE CHANGES IN THE FUTURE

GEORGIEVSKY MIKHAIL VLADIMIROVICH^{✉1}, candidate of geographical sciences, head of the personnel training department

mgeorgievsky@hotmail.com

GOROSHKOVA NATALIA IVANOVNA^{✉1}, candidate of technical sciences, senior researcher

goroshnat@yandex.ru

KHOMYAKOVA VICTORIA ANDREEVNA², 1st-year master's student

curcuma162@gmail.com

STRIZHENOK ANASTASIA VLADIMIROVNA¹, junior researcher

anastasiastrizhenok@mail.ru

¹ State Hydrological Institute; 199004, St. Petersburg, 2nd line V. O.23. Russia

² Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University; 199034, St. Petersburg, 10th Vasilievsky admin line Island, 31-33. Russia

The article presents an analysis of the impact of climate change on the main characteristics of ice phenomena, snow cover and the water regime in the Small Northern Dvina River basin occurring in recent decades. Recently, a significant climate warming has been observed in the basin. As a result, winters are getting warmer and shorter. There is also an increase in winter precipitation and the number of thaws. Climate warming directly affects the duration of snow cover, which decreases both due to the later formation and to the earlier destruction of snow. There is also a slight downward trend in the annual values of the maximum snow water equivalent, which may be the result of an increase in the number of thaws in winter, when a part of the snow cover melts contributing to the winter river runoff. The analysis of the main characteristics of the ice cover on the rivers of the studied basin shows that their changes are similarly to changes in the snow cover: there is a reduction in the freeze-up period due to its later formation and earlier complete destruction. The maximum ice thickness on the rivers of the basin also tends to decrease. There is an increase in winter and a decrease in spring runoff. Predictive estimates of changes in the observed trends in the future are presented in the final part of the article based on the CMIP5 project data.

Keywords: climate change, forecasting future changes, ice phenomena, maximum snow water equivalent, Northern Dvina, river ice, snow cover, winter river runoff

Format of citation: Georgievsky M.V., Goroshkova N.I., Khomyakova V.A., Strizhenok A.V. Assessment of changes in the characteristics of the water, snow and ice regimes in the basins of the Small Northern Dvina River under the modern conditions and their possible changes in future // *Prirodobustroystvo*. – 2021. – № 3. – S. 117-127. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-3-117-127.

Введение. Наблюдающиеся почти ежегодно зажоры и заторы, являющиеся неотъемлемой составной частью процессов замерзания и вскрытия рек севера Европейской России, нередко приводят к образованию катастрофических наводнений, приносящих значительный материальный ущерб. К сожалению, многообразие факторов и влияние местных условий на процесс заторообразования не позволяют составить единую для обширных территорий методику прогноза [1].

Формирование заторных наводнений обусловлено холодными климатическими условиями в бассейнах северных рек, наличием на них достаточно мощного ледяного покрова, разрушение которого волной весеннего половодья резко уменьшает пропускную способность русла и приводит к быстрому росту уровня воды выше очага затора [2].

В бассейне Северной Двины 114 заторных участков. Повторяемость заторов на некоторых из них достигает 86%. Заторные подъемы уровней колеблются

от 80 см (реки Верхняя Тойма, Яренга, Ежуга) до 100-150 см и более (реки Северная Двина, Сухона, Пинега и др.). Максимальные заторные уровни воды на Северной Двине часто превышают наивысшие уровни весенних половодий и дождевых паводков [3].

Согласно исследованиям [4] климатические изменения, происходящие на территории севера России, также затронули бассейн р. Северная Двина. В связи с этим задача прогнозирования максимальных весенних уровней (с учетом заторной составляющей), а также рационального планирования противозаторных мероприятий в последние годы приобретает новые аспекты. Потепление климата приводит к изменениям вкладов затороформирующих факторов в прогнозные зависимости [1, 5]. Поэтому возникает необходимость оценки величины и интенсивности наблюдаемых климатических изменений в рамках исследуемого бассейна и выявления их влияния на характеристики водного и ледового режимов рек. В дальнейшем это позволит адаптировать методики прогноза заторных наводнений к изменяющимся условиям, что особенно актуально для узла рек Сухона-Юг-Малая Северная Двина, где разрушительные заторные наводнения происходят наиболее часто [3, 5].

Материалы. Исходная информация по гидрологическим постам была взята из гидрологических ежегодников за период с 1950 по 2017 гг. Были сформированы массивы данных по следующим характеристикам: суточные данные по ледовым явлениям на реках бассейна, ежедневные и средние месячные уровни воды, максимальные годовые уровни воды, ежедневные и средние месячные расходы воды.

В качестве исходной метеорологической информации использовались два источника данных: метеорологические архивы Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (далее – архивы ВНИИГМИ-МЦД) – и данные климатического сеточного архива ClimateResearchUnit TS4.02 (далее – CRU) [6].

В исследованиях использовались следующие архивы ВНИИГМИ-МЦД: массив данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР; массив данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России; массив данных месячных сумм осадков на станциях России;

массив данных «Характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР»; массив данных «Маршрутные снегомерные съемки».

В качестве дополнительной информации, а также альтернативы для анализа изменений снежного покрова в исследуемом бассейне были выбраны две глобальные сеточные базы данных, предоставляющие информацию по месячным значениям влагозапасов в снежном покрове, доступные на сайте Национального центра данных по снегу и льду США (www.nsidc.org): Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data [7] (далее – CMC) и ESA Glob Snow Snow Water Equivalent [8] (далее – ESA). Выбор вышеперечисленных альтернативных источников информации основывался на том, что данные архивы в результате выполненного сравнительного анализа точности значений влагозапасов в снежном покрове продемонстрировали наиболее близкие к наземным наблюдениям (снегомерным съемкам) величины влагозапасов [9].

Методы и результаты исследований. *Климатические изменения.* На рисунке 1 представлены результаты анализа основных климатических изменений, происходящих в бассейне р. Малая Северная Двина, полученные на основе данных по температуре воздуха, атмосферным осадкам (рис. 1а, 1б) и количеству холодных дней в месяце из климатического архива CRU. Они демонстрируют происходящее в последние десятилетия в бассейне р. Малая Северная Двина существенное потепление климата, которое непосредственно влияет на сезонные температуры воздуха, главным образом – на зимние. В результате этих изменений зимы в исследуемом бассейне становятся теплее (рис. 1в (1)) и короче (рис. 1в (2)) ввиду того, что существенно уменьшается количество дней с отрицательной температурой в осенние и весенние месяцы. При этом за счет увеличения зимних осадков они являются еще и более заснеженными (рис. 1в (3)).

Полученные по данным CRU результаты подтверждаются анализом температурно-влажностного режима, выполненного на основе данных наземных наблюдений за приземной температурой воздуха и осадками.

Изменения характеристик снежного покрова. Анализ изменений основных характеристик снежного покрова в бассейне р. Малая Северная Двина осуществлялся на основе архивов ВНИИГМИ-МЦД

«Характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР» и «Маршрутные снегомерные

съёмки», а также глобальных сеточных архивов данных по влагозапасам в снежном покрове (ESA и СМС).

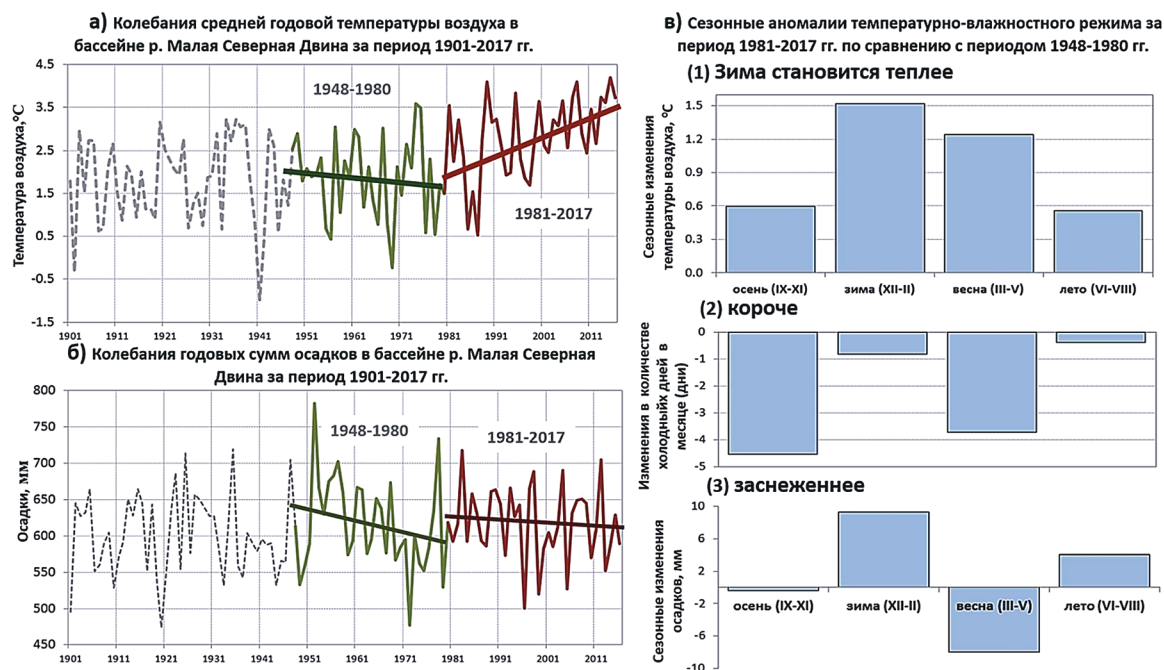


Рис. 1. Анализ климатических изменений, происходящих в бассейне р. Малая Северная Двина в последние десятилетия, выполненный на основе данных климатического архива CRUTS4.02

Fig. 1. Analysis of climate changes occurring in the Small Northern Dvina River basin in recent decades, based on the CRUTS4.02 data

По данным суточных наблюдений за высотой снежного покрова для трех метеорологических станций: Великий Устюг (22981), Вологда (27037) и Тотьма (27051) – были определены сроки залегания устойчивого снежного покрова (даты его установления и разрушения), а также ежегодная продолжительность этой характеристики за период 1969-2017 гг. Для расчета продолжительности дополнительно использовались данные метеостанции Никольск (27066).

При анализе многолетних изменений запаса воды в снеге использовались данные маршрутных снегомерных съёмок по четырем метеорологическим станциям: 22981, 27051, 27066 и Опарино (27083) – за период 1964-2017 гг. Декадные и пентадные значения приводились к месячным с целью сопоставления с данными альтернативных источников информации – значения максимальных влагозапасов за зимний период из архивов ESA и СМС.

В результате анализа был выявлен период выраженных климатических изменений, а именно период существенного потепления за зимний период, начало которого

в среднем по всем использованным метеостанциям приходится на 1980 г.

На рисунке 2 представлен ход рассматриваемых характеристик снежного покрова в бассейне р. Малая Северная Двина с 1980 г. по настоящее время.

Как следует из рисунка 2, полученные результаты полностью согласуются с выводами комплексного анализа, представленными на рисунке 1, а именно:

- потепление климата сказывается на продолжительности залегания снега, которая уменьшается за счет как более позднего формирования, так и более раннего разрушения снежного покрова, что демонстрируют тренды по всем трем метеостанциям (четырем для продолжительности залегания), участвовавшим в проведении анализа;

- в то же время наблюдается незначительная тенденция уменьшения максимальных снегозапасов в бассейне, что может быть следствием увеличения количества оттепелей зимой, во время которых часть снежного покрова стаивает, пополняя зимний речной сток. Это подтверждается анализом изменений речного стока, который представлен ниже.

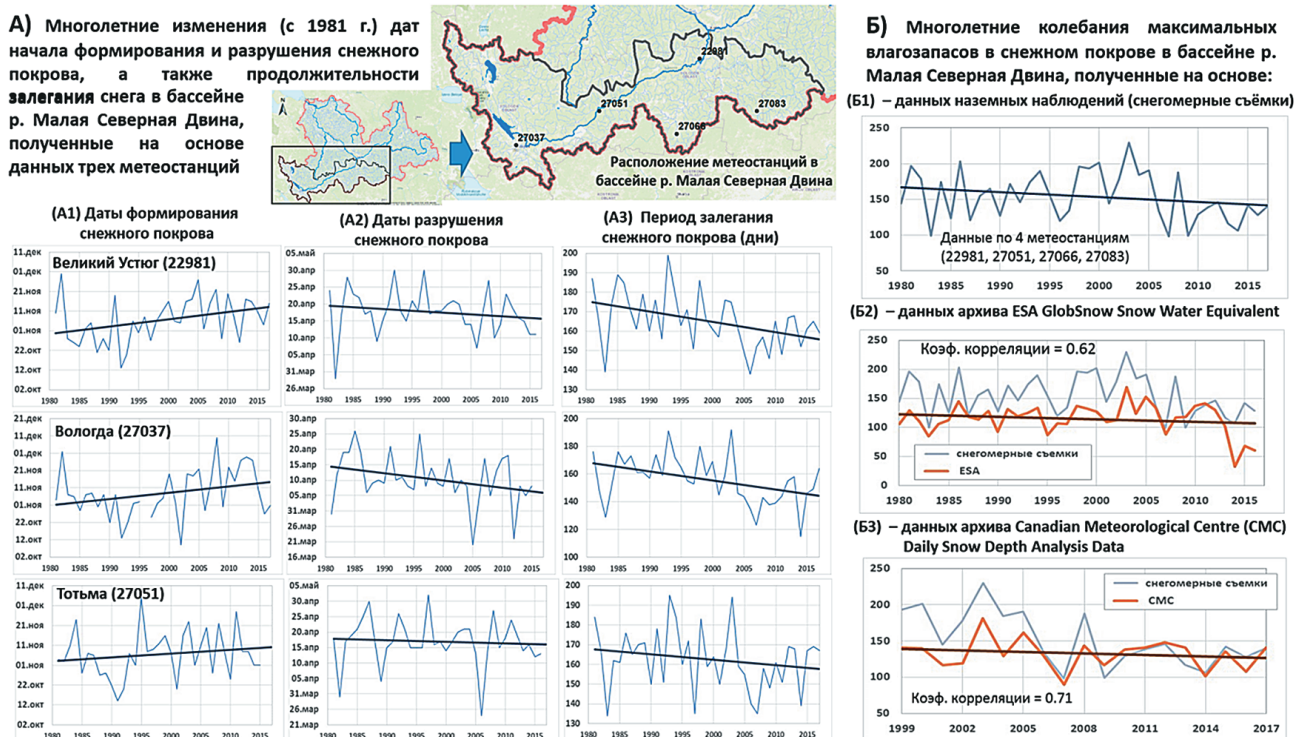


Рис. 2. Анализ изменений основных характеристик снежного покрова в бассейне р. Малая Северная Двина в течение последних десятилетий начиная с 1980 г., выполненный на основе наземных наблюдений и глобальных сеточных архивов данных по влагозапасам в снежном покрове

Fig. 2. Analysis of changes in the main characteristics of snow cover in the Small Northern Dvina River basin during the last decades since 1980 based on ground-based observations and global databases data on snow water equivalent

При сравнении полученных результатов (рис. 2Б1) с альтернативными источниками информации установлено, что данные архивов ESA (рис. 2Б2) и СМС (рис. 2Б3) коррелируют с данными наземных наблюдений (коэффициент корреляции – 0.62 и 0.71 соответственно), демонстрируя при этом аналогичную тенденцию уменьшения максимальных запасов воды в снеге на территории исследуемого бассейна.

Изменения характеристик речного льда. На рисунке 3 представлены результаты анализа изменений основных характеристик ледовых явлений на реках исследуемого бассейна за период 1951-2016 гг., осуществленного на основе полученной из гидрологических ежегодников и оцифрованной специализированной информационной базы суточных данных для рек бассейна Северной Двины.

Анализ рассматриваемых характеристик показывает, что они изменяются аналогично изменению характеристик снежного покрова с одной лишь разницей: данные по ледовым явлениям доступны с 1951 г. Это позволяет осуществить сравнение происходящих изменений за два примерно

одинаковых по продолжительности периода: стационарного климата 1951-1980 гг. и периода ярко выраженных климатических изменений 1981-2016 гг.

На реках исследуемого бассейна в последние десятилетия происходит сокращение периода ледостава за счет более позднего формирования льда и более раннего его полного разрушения. Наиболее существенно смещаются даты начала ледостава (на 5-17 дней) по сравнению с датами его окончания (на 2-5 дней). При этом данные тенденции наблюдаются на всех шести гидрологических постах (г/п), участвовавших в проведении анализа, включая г/п р. Северная Двина – г. Котлас, который не входит в исследуемый бассейн, но был включен в расчеты, так как располагается ниже по течению и подвержен влиянию изменений, происходящих в вышерасположенных створах. Смещение дат начала и конца ледовых явлений приводит к существенному сокращению периода ледостава, продолжительность которого наиболее значительно уменьшилась на р. Сухона (на 14-19 дней) – на том участке (от г. Тотьма до г. Великий Устюг), который

наиболее сильно подвержен образованию заторов и заторным наводнениям [5, 10].

Одновременно со сроками ледостава на всех гидрологических постах в исследуемом бассейне, за исключением

р. Ема – с. Новое, уменьшается максимальная толщина льда. При этом наиболее существенные изменения наблюдаются на вышеуказанном затороопасном участке р. Сухона (на 8-19 см, 13-25%).

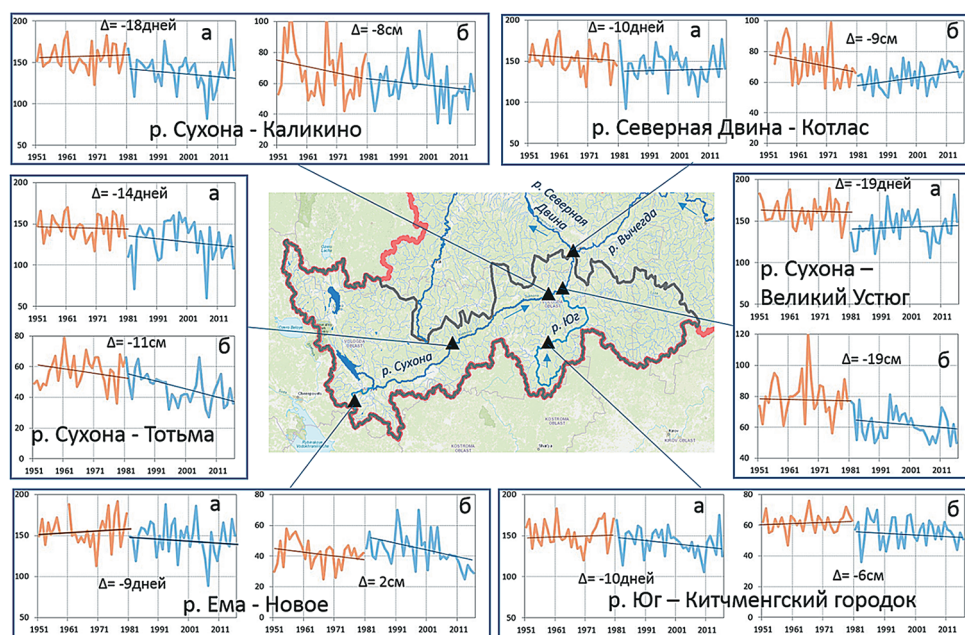


Рис. 3. Изменения продолжительности, дни, ледостава (а) и максимальной толщины, см, ледового покрова (б) на реках бассейна р. Малая Северная Двина за период 1981-2016 гг. по сравнению с периодом 1951-1980 гг.

Fig. 3. Changes in the duration, days, of freeze-up (a) and maximum thickness, cm, of the ice cover (b) on the rivers of the Small Northern Dvina River basin for the 1981-2016 period compared with the period of 1951-1980

Изменения речного стока и максимальных уровней воды. Согласно исследованиям, выполненным в Государственном гидрологическом институте, на территории Российской Федерации в последние десятилетия происходит существенное увеличение зимнего стока рек [4, 11-13]. Представленные ниже изменения речного стока в исследуемом бассейне полностью согласуются с данным выводом.

Как следует из таблицы 1, в бассейне р. Малая Северная Двина аналогично тенденции, отмечаемой на территории страны, происходит существенное увеличение зимнего стока (по всем четырем г/п) при снижении доли весеннего. Данную тенденцию можно объяснить увеличением количества зимних осадков (результаты анализа CRU и архивов ВНИИГМИ-МЦД) в последние десятилетия при одновременном увеличении зимней температуры воздуха (CRU и ВНИИГМИ-МЦД), и как результат – увеличением количества оттепелей (ВНИИГМИ-МЦД), что также

подтверждается уменьшением максимальных влагозапасов и более короткой продолжительностью залегания снежного покрова в исследуемом бассейне (ВНИИГМИ-МЦД, ESA и СМС).

Значительная часть выпавших зимних осадков таит по причине увеличившегося количества дней с положительными температурами воздуха, что приводит к изменению внутригодового распределения стока – увеличению зимней и уменьшению весенней его составляющих.

Изменения максимальных годовых уровней воды на реках исследуемого бассейна, которые (за редким исключением) являются наивысшими уровнями весеннего половодья, представленные в таблице 2, подтверждают вывод о перераспределении речного стока: об уменьшении доли стока весеннего половодья в пользу зимнего меженьного. Изменения максимальных уровней аналогичны изменениям весенних расходов воды (табл. 1), за исключением г/п р. Сухона – г. Великий Устюг, где уровни

за последние десятилетия существенно повысились. На этом участке р. Сухоны наиболее явно выражены изменения условий формирования осенних зажоров, мощность которых возрастает в последние годы в связи с повышением осенних температур. Рост уровней воды в начале ледостава способствует увеличению уровней при весеннем вскрытии реки и, таким образом, более

частому формированию заторов, что наиболее характерно именно для участка от г. Великий Устюг до г. Красавино на р. Малая Северная Двина. Тенденция роста экстремальных гидрологических явлений, обусловленных образованием ледовых заторов, приводящих к значительному экономическому ущербу, является следствием климатических изменений в данном районе.

Таблица 1

Аномалии среднего годового, весеннего и зимнего речного стока в бассейне р. Малая Северная Двина за период 1981-2017 гг. по сравнению с периодом 1951-1980 гг.

Table 1

Anomalies of the annual, spring and winter river runoff in the Small Northern Dvina River basin for the 1981-2017 period compared with the period of 1951-1980

Гидрологический пост <i>Hydrological post</i>	Годовой сток (м ³ /сек) <i>Annual runoff (m³/sec)</i>			Зимний сток (XI-III) (м ³ /сек) <i>Winter runoff (XI-III) (m³/sec)</i>			Весенний сток (IV-V) (м ³ /сек) <i>Spring runoff (m³/sec)</i>		
	1951 ÷ ÷ 1980	1981 ÷ ÷ 2017	аномалии (Δ) <i>anomalies</i>	1951 ÷ ÷ 1980	1981 ÷ ÷ 2017	аномалии (Δ) <i>anomalies</i>	1951 ÷ ÷ 1980	1981 ÷ ÷ 2017	аномалии (Δ) <i>anomalies</i>
р. Ема – Новое <i>r. Ema – Novoe</i>	1.44	1.55	0.11* (7%)**	0.30	0.60	0.30 (64%)	6.31	6.01	-0.30 (-5%)
р. Юг – Кичменгский Городок*** <i>r. Yug – Kichmengsky Gorodok</i>	71.6	81.6	10.0 (13%)	32.6	26.9	5.7 (19%)	237	256	19 (8%)
р. Сухоны – Тотьма <i>r. Sohona – Totjma</i>	300	301	0.3 (0.1%)	113	121	8.4 (7%)	767	755	-12 (-2%)
р. Сухоны – Каликино <i>r. Sohona – Kalikino</i>	431	415	-16 (-4%)	157	171	14 (9%)	1197	1154	-43 (-4%)

* – жирным шрифтом выделены положительные аномалии;

** – в скобках указаны аномалии в процентах относительно среднего значения за весь период наблюдений;

*** – так как данные по р. Юг доступны только с 1957, анализировались периоды: 1957-1985 и 1986-2017.

* – *in bold, positive anomalies are highlighted;*

** – *brackets indicate anomalies as a percentage of the average for the entire period of observations;*

*** – *as data on the r. Yug are available only since 1957, the periods were analyzed: 1957-1985 and 1986-2017.*

Вероятные изменения речного стока в будущем. Предположения о вероятных будущих изменениях гидрологического режима в исследуемом бассейне основываются на прогнозных оценках изменений ресурсов крупнейших рек Российской Федерации включая бассейн р. Северная Двина, выполненных авторами на основе данных по речному стоку проекта СМР5 [14], а также результатов исследований [15-19].

Необходимо отметить, что результаты всех вышеуказанных исследований для бассейна р. Северная Двина (также и для всей территории Российской Федерации) согласуются между собой, демонстрируя схожие

тенденции пространственно-временных изменений температурно-влажностного режима, и как результат – речных водных ресурсов.

На рисунке 4 представлены изменения средних многолетних значений годовых слоев стока на перспективу 2030 и 2050 гг. (то есть на середину прогнозных периодов 2021-2040 гг. и 2041-2060 гг.) по сравнению с базовым периодом 1981-2000 гг., рассчитанные по ансамблю из 24 совмещенных гидродинамических моделей для бассейна р. Северная Двина на основе двух проекций возможного изменения климата RCP4.5 (умеренный сценарий) и RCP8.5 (экстремальный сценарий).

**Аномалии максимальных (весенних) уровней воды
в бассейне р. Малая Северная Двина за период 1981-2016 гг.
по сравнению с периодом 1951-1980 гг.**

Table 2

**Anomalies of the maximum (spring) water levels in the Small Northern Dvina River basin
for the 1981-2016 period compared with the period of 1951-1980**

Гидрологический пост <i>Hydrological post</i>	1951 ÷ 1980	1981 ÷ 2016	Изменение (1981 ÷ 2016 – 1951 ÷ 1980) <i>Change (1981 ÷ 2016 – 1951 ÷ 1980)</i>	
			ИЗМ. В ММ <i>change in mm</i>	ИЗМ. В % <i>change in %</i>
р. Ема – Новое <i>r. Ema – Novoe</i>	259	251	-8*	-3**
р. Юг – Кичменгский Городок <i>r. Yug – Kichmensky Gorodok</i>	573	590	17	3
р. Сухона – Тотьма <i>r. Suhona – Totjma</i>	565	561	-4	-1
р. Сухона – Каликино <i>r. Suhona – Kalikino</i>	678	652	-26	-4
р. Сухона – Великий Устюг <i>r. Suhona – Velikij Ustyug</i>	630	656	26	4
р. Северная Двина – Котлас <i>r. Severnaya Dvina – Kotlas</i>	619	605	-14	-2

* – жирным шрифтом выделены отрицательные аномалии;

** – указаны аномалии в процентах относительно среднего значения за весь период наблюдений, %.

* – *in bold, negative anomalies are highlighted;*

** – *anomalies are indicated as a percentage of the average for the entire period of observations.*

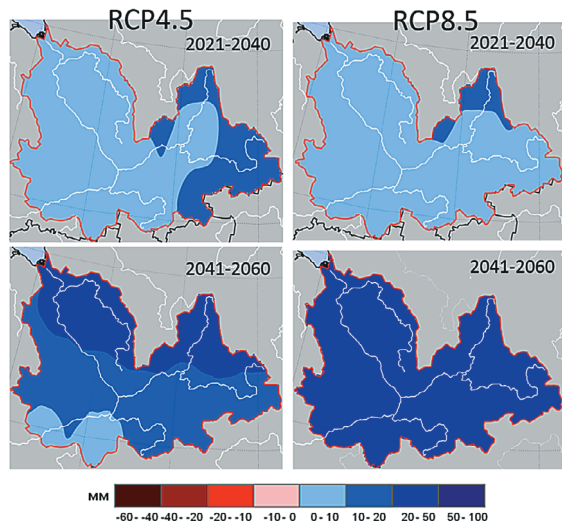


Рис. 4. Возможные изменения годовых слоев стока по территории бассейна р. Северной Двины на перспективу 2030 и 2050 гг., рассчитанные на основе ансамбля 24 гидродинамических моделей проекта СМIP5

Fig.4. Possible changes in annual runoff layers over the territory of the Small Northern Dvina River basin for the prospect of 2030 and 2050 calculated on the basis of an ensemble of 24 models of the CMIP5 project

В ближайшие десятилетия, согласно представленным результатам, наиболее вероятным является незначительное увеличение годового стока, которое (с большой долей вероятности) будет находиться в пределах его естественной изменчивости.

Как показывают модельные расчеты, проведенные в рамках современных представлений о изменении климата в XXI в. [14, 16-19], гидроклиматический режим р. Северная Двина в ближайшие десятилетия по своим основным параметрам будет близким к наблюдавшемуся в последние 30-35 лет. Ожидаемое повышение температуры воздуха, особенно в зимние месяцы, а также перераспределение сезонных осадков позволяют полагать, что существующие тенденции изменения характеристик снежного, ледового и водного режимов сохранятся. При этом относительная доля зимнего стока в годовом стоке будет увеличиваться, а весеннего стока – уменьшаться.

Выводы

Обобщая полученные в ходе выполненных исследований результаты, можно сделать следующие выводы:

- в исследуемом бассейне происходят существенные климатические изменения,

выраженные потеплением климата и сезонным перераспределением осадков;

- значительное повышение температуры воздуха происходит в каждый из четырех сезонов года с максимумом зимой и весной;

- увеличивается количество зимних осадков при уменьшении осадков весной;

- возрастает количество оттепелей в зимние месяцы;

- изменение климата, происходящее в бассейне, напрямую влияет на основные характеристики ледяного и снежного покровов, а также речной сток;

- начиная с 1980 г. в бассейне наблюдаются тенденции сокращения периода залегания снежного покрова и незначительного уменьшения значений максимальных запасов воды в снеге;

- изменения в характеристиках ледяного покрова аналогичны изменениям

в снежном покрове: начиная с 1980 г. происходит сокращение периода ледостава (главным образом за счет более поздних дат начала его формирования), а также уменьшение максимальной толщины льда на реках бассейна;

- происходит перераспределение речного стока – уменьшение доли весеннего стока и увеличение его зимней составляющей;

- наблюдающиеся в настоящий момент тенденции гидроклиматических изменений, по всей видимости, сохранятся в ближайшем будущем;

- вероятность возникновения высоких заторных наводнений не снижается;

- на участках, наиболее сильно подверженных образованию ледовых заторов в исследуемом бассейне, необходимо скорейшее завершение строительства противозаторных сооружений.

Библиографический список

1. Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. – СПб.: ГГИ, 2015. – 240 с.

2. Агафонова С.А., Василенко А.Н., Фролова Н.Л. Факторы образования ледовых заторов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях // Вестник Московского университета. – Серия 5 «География». – 2016. – № . – С. 82-90.

3. Отчет ФГБУ ГГИ «Комплексные исследования русловых процессов и формирования заторов льда в узле слияния Сухона-Юг-Малая-Северная Двина с целью регулирования процессов заторообразования и разработки противопаводковых мероприятий у г. Великий Устюг». – СПб.: ФГБУ ГГИ, 2014. – 221 с.

4. Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата // Пленарные доклады VII Всероссийского гидрологического съезда, 19-21 ноября 2013 г. – СПб.: ГГИ, 2014. – С. 79-102.

5. Условия формирования и полевые исследования ледового затора, послужившего причиной наводнения на р. Сухона у г. Великий Устюг весной 2016 г. / М.В. Георгиевский, Н.И. Горошкова, В.С. Полякова и др. // ГЕОРИСК. – 2017. – № 4. – С. 40-48.

6. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // International Journal of Climatology. – 2014. – 34. – P. 623-642. Doi: 10.1002/joc.3711.

7. Brown R.D., Brasnett B. Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow

References

1. Buzin V.A. Zazhory i zatory lda na reкахRossii – SPb: GGI, 2015. – 240 s.

2. Agafonova S.A., Vasilenko A.N., Frolova N.L. Faktory obrazovaniya ledovyh zatorov na reках bassejna Severnoj Dviny v sovremennyh usloviyah // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. – 2016. – № 2. S. – 82-90.

3. Otchet FGBU «GGI» «Kompleksnyye issledovaniya ruslovyh protsessov i formirovaniya zatorov lda v uzle sliyaniya Suxona-Yug-Malaya-Severnaya Dvina s tsel'yu uregulirovaniya protsessov zatoroobrazovaniya i razrabotki protivopavodkovykh meropriyatij u g. Velikij Ustyug». – SPb.: FGBU «GGI», 2014. – 221 s.

4. Georgievskij V.Yu., Koronkevich N.I., Alekseevskij N.I. Vodnye resursy i gidrologicheskij rezhim rek RF v usloviyah izmeneniya klimata // Plenarnye doklady VII Vserossiyskogo gidrologicheskogo sjezda, 19-21 noyabrya 2013 g. – SPb: GGI, 2014. – S. 79-102.

5. Georgievskij M.V., Goroshkova N.I., Polyakova V.S., Golovanov O.F., Georgievskij D.V., Skripnik E.N. Usloviya formirovaniya i polevye issledovaniya ledovogo zatora, posluzhivshego prichinoj navodneniya na r. Suhona u g. Velikij Ustyug vesnoj 2016 g. // GEORISK. – 2017. – № 4. – S. 40-48.

6. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // International Journal of Climatology. – 2014. – 34. – P. 623-642. – doi:10.1002/joc.3711.

7. Brown R.D., Brasnett B. Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow

Depth Analysis Data, Version 1. – Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2010. – URL: <https://doi.org/10.5067/W9FOYWH0EQZ3>.

8. Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements / M. Takala, K. Luojus, J. Pulliainen i dr. // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – 115. – P. 3517-3529. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>.

9. **Георгиевский М.В., Хомякова В.А., Паршина Т.В.** Оценка точности глобальных данных по влагозапасам в снежном покрове на примере бассейна р. Северная Двина // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. – 2020. – 65(3). – С. 434-454. Doi: 10.21638/spbu07.2020.302.

10. Экстремальное заторное наводнение весной 2016 г. на р. Сухона у г. Великий Устюг (формирование, прогноз, последствия) / М.В. Георгиевский, Н.И. Горошкова, В.С. Полякова и др. // *Метеорология и гидрология*. – 2018. – № 2. – С. 108-114.

11. **Георгиевский В.Ю.** Водные ресурсы рек Российской Федерации // *Труды IV Всероссийской научн. конф. «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов»*, 15-18 сентября 2015 г. – М.: ИВП РАН, 2015. – С. 5-8.

12. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – М.: Росгидромет, 2014. – 20 с.

13. **Georgievsky M.** Water resources of the Russian rivers and their changes // *Proc. IAHS*. – 2016. – 374. – P. 75-77. Doi: 10.5194/piahs-374-75-2016.

14. **Георгиевский М.В., Голованов О.Ф.** Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5 // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. – 2019. – № 64(2) – С. 206-219.

15. Прогнозные оценки изменений стока рек на основе климатических сценариев // *Водные ресурсы России и их использование* / И.А. Шикломанов, В.Ю. Георгиевский, А.Л. Шалыгин и др. / ред. И.А. Шикломанов. – СПб.: ГГИ, 2008. – С. 442-462.

16. **Кокарев В.А., Шерстюков А.Б.** О метеорологических данных для изучения

Depth Analysis Data, Version 1. – Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2010. – URL: <https://doi.org/10.5067/W9FOYWH0EQZ3>.

8. Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements / M. Takala, K. Luojus, J. Pulliainen i dr. // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – 115. – P. 3517-3529. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>.

9. **Georgievskij M.V., Khomyakova V.A., Parshina T.V.** Otsenka tochnosti globalnykh dannykh po vlagozapasam v snezhnom pokrove na primere bassejna r. Severnaya Dvina // *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle* – 2020. – 65(3). – S. 434-454. – URL: doi:10.21638/spbu07.2020.302.

10. Экстремальное заторное наводнение весной 2016 г. на р. Сухона у г. Великий Устюг (формирование, прогноз, последствия) / Georgievskij M.V., Goroshkova N.I., Polyakova V.S. i dr. // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 2018. – № 2. – S. 108-114.

11. **Georgievskij V.Yu.** Vodnye resursy rek Rossijskoj Federatsii // *Trudy IV Vserossijskoj nauchnoj konferentsii «Fundamentalnye problemy vody i vodnykh resursov»*, 15-18 sentyabrya 2015 g. Moskva. – 2015. – S. 5-8.

12. Vtoroj otsenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federatsii. Obshchee rezyume. – М: Rosgidromet, 2014. – 20 s.

13. **Georgievsky M.** Water resources of the Russian rivers and their changes // *Proc. IAHS*. – 2016. – 374. – P. 75-77. – URL: doi:10.5194/piahs-374-75-2016.

14. **Georgievskij M.V., Golovanov O.F.** Prognoznye otsenki izmenenij vodnykh resursov krupnejshih rek Rossijskoj Federatsii na osnove dannykh po rechnomu stoku proekta CMIP5 // *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle*. – 2019. – 64(2) – S. 206-219. URL: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.203>

15. Prognoznye otsenki izmenenij stoka rek na osnove klimaticheskikh stsensarijev // *Vodnye resursy` Rossii i ih ispolzovanie* / Shiklomanov I.A., Georgievskij V.Yu., Shalygin A.L. i dr. / Red. I.A. Shiklomanov. – SPb.: Gosudarstvenny`gidrologicheskij institut, 2008. – S. 442-462.

16. **Kokarev V.A., Sherstyukov A.B.** O meteorologicheskikh dannykh dlya izucheniya sovremennyh i budushchih izmenenij klimata natorritorii Rossii // *ARKTIKA. XXI*

современных и будущих изменений климата на территории России // АРТИКА. XXI век. Естественные науки. – 2015. – № 2(3). – С. 5-23.

17. **Анисимов О.А., Кокарев В.А.** Климат в арктической зоне России: анализ современных изменений и модельные проекции на XXI век // Вестник Московского университета. Сер. 5 «География». – 2016. – № 1. – С. 61-69.

18. **Катцов В.М., Говоркова В.А.** Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды ГГО. – 2013. – Вып. 569. – С. 75-97.

19. Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке / И.М. Школьник, В.П. Мелешко, И.Л. Кароль и др. // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 575. – С. 65-118.

Критерии авторства

Георгиевский М.Н., Горошкова Н.И., Хомякова В.А., Стриженок А.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись.

Георгиевский М.Н., Горошкова Н.И., Хомякова В.А., Стриженок А.В. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 05.06.2021 г.

Одобрена после рецензирования 15.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

vek. Estestvennye nauki. – 2015. – № 2(3). – С. 5-23.

17. **Anisimov O.A., Kokarev V.A.** Klimat v arkticheskoj zone Rossii: analiz sovremennyh izmenenij i modelnye proektsii na XXI vek // VEST. MOSK. UN-TA. SER. 5. GEOGRAFIYA. – 2016. – № 1. – С. 61-69.

18. **Katsov V.M., Govorkova V.A.** Ozhidaemye izmeneniya prizemnoj temperatury` vozduha, osadkov i godovogo stoka na territorii Rossii v XXI-m veke: rezultaty raschetov s pomoshchyu ansamblya globalnyh klimaticheskikh modelej (CMIP5) // Trudy` GGO. – 2013. – Вып. 569, – С. 75-97.

19. Ozhidaemye izmeneniya klimata na territorii Rossijskoj Federatsii v XXI veke / Shkolnik I.M., Meleshko V.P., Karol I.L. i dr. // Trudy` GGO. – 2014. – Вып. 575, – С. 65-118.

Criteria of authorship

Georgievsky M.N., Goroshkova N.I., Khomyakova V.A., Strizhenok A.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript.

Georgievsky M.N., Goroshkova N.I., Khomyakova V.A., Strizhenok A.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 05.06.2021

Approved after reviewing 15.06.2021

Accepted for publication 28.06.2021