

УДК [556.535:551.583](282.247.13)«323/324» doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-466-479

**Влияние климатических изменений
в осенне-зимний период на гидрологический режим рек
бассейна Малой Северной Двины**

*М.В. Георгиевский¹, Н.И. Горошкова¹, В.А. Хомякова²,
Д.В. Георгиевский¹, А.К. Пленкина²*

¹ ФГБУ «Государственный гидрологический институт», mgeorgievsky@hotmail.com

² Санкт-Петербургский государственный университет

В статье представлен анализ изменений климата в осенне-зимний период года и оценен результат влияния этих изменений на водный и ледовый режимы рек в бассейне р. Малой Северной Двины. Полученные результаты свидетельствуют об интенсивном повышении температуры воздуха в холодные месяцы, начавшемся в исследуемом бассейне во второй половине 1980-х гг., которое приводит к сокращению периодов ледостава и залегания снежного покрова, а также уменьшению максимальной толщины льда и значений максимального запаса воды в снежном покрове. В бассейне происходит внутrigодовое перераспределение стока: уменьшение весенней и увеличение зимней его составляющих. В статье дан качественный анализ влияния наблюдаемых изменений на формирование заторов в узле рек Сухона—Юг у г. Великий Устюг.

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

**Impact of climate change in autumn-winter period
on hydrological regime of the rivers
in the Small Northern Dvina river basin**

*M.V. Georgievsky¹, N.I. Goroshkova¹, V.A. Khomiakova²,
D.V. Georgievsky¹, A.K. Plenkina²*

¹ FSBI «State Hydrological Institute», St. Petersburg, Russia, mgeorgievsky@hotmail.com

² Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia

The article presents the analysis of climate changes in the autumn-winter period and assesses the impact of these changes on the water and ice regimes of rivers in the Small Northern Dvina River basin. The results obtained indicate an intensive increase in air temperature during the cold months, which began in the basin under study in the late 1980s and leads to the reduced periods of freeze-up and snow cover, as well as to the decreased maximum values of ice thickness and snow water equivalent. In the last 20 years, a decrease in the maximum snow water equivalent, causing a decrease in water discharge and runoff layers of the spring flood, has been observed. There occurs an intra-annual redistribution of runoff in the basin due to a decrease in spring runoff and an increase in winter runoff. This effect is most pronounced for small rivers. The article also analyzes the influence of the observed changes on the formation of ice jams in the Sukhona — South rivers junction near the city of Veliky Ustyug.

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

For citation: *M.V. Georgievsky, N.I. Goroshkova, V.A. Khomiakova, D.V. Georgievsky, A.K. Plenkina. Impact of climate change in autumn-winter period on hydrological regime of the rivers in the Small Northern Dvina river basin. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 64: 466—479. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-466-479.*

Введение

Река Северная Двина является одновременно сложным и привлекательным с научной точки зрения объектом исследований. Принадлежность к крупнейшим рекам Европы и Российской Федерации, многовековая история заторных наводнений, проблемы судоходства, а также достаточно хорошая гидрометеорологическая изученность — все это привлекает внимание научно-исследовательских групп. Катастрофическое наводнение, произошедшее весной 2016 г. у г. Великий Устюг [1], вновь обнажило проблему заторных наводнений, периодически происходящих в узле рек Сухона—Юг—Малая Северная Двина. Эта проблема до сих пор не получила однозначного решения. Даты и максимальные уровни при заторах прогнозируются с достаточной степенью достоверности, но меры, направленные на предотвращение негативных последствий, не всегда достигают цели [2].

Задача прогнозирования максимальных весенних уровней (с учетом заторной составляющей), а также рационального планирования противозаторных мероприятий в последние годы приобретает новые аспекты. Согласно исследованиям [3], климатические изменения, происходящие на территории нашей страны (и всего мира), затронули и рассматриваемый регион. Потепление климата приводит к изменениям вкладов затороформирующих факторов в прогнозные зависимости [4]. Основная цель исследований — оценка величины и интенсивности изменений, наблюдаемых в температурно-влажностном режиме исследуемого бассейна и выявлении их влияния на характеристики водного и ледового режимов рек бассейна Малой Северной Двины.

Исследования выполнены на основе специализированной информационной базы многолетних гидрометеорологических данных бассейна р. Северной Двины [5], разработанной в Государственном гидрологическом институте в рамках бюджетной темы Росгидромета и входящей в структуру геоинформационной системы мониторинга, целью которой является оценка вероятности возникновения опасных заторных наводнений в будущем.

Характеристика бассейна и исходные данные

Река Малая Северная Двина (рис. 1) образуется при слиянии рек Сухона и Юг у г. Великий Устюг. Ее длина составляет всего 74 км, до места впадения р. Вычегды, начиная с которого река именуется Северной Двиной. В узле слияния рек Сухона и Юг возникают опасные гидрологические явления — заторы льда, иногда приводящие к катастрофическим наводнениям и затоплению г. Великий Устюг и его окрестностей. Формированию заторов способствуют протяженные

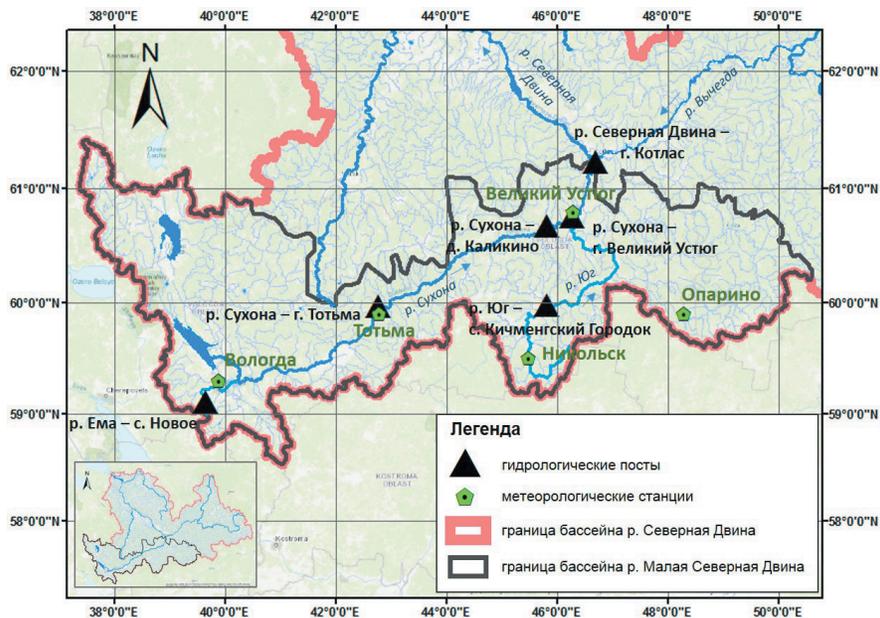


Рис. 1. Местоположение метеорологических станций и гидрологических постов в бассейне р. Малой Северной Двины.

Fig. 1. The location of meteorological stations and hydrological gauges in the Malaya Northern Dvina River basin.

перекатные участки, имеющиеся как ниже узла слияния рек Сухоны и Юга, так и на самой Сухоне выше г. Великий Устюг [1, 2]. Затопы здесь формируются практически ежегодно, причем ими обусловлены 57 % максимальных уровней весеннего половодья [6].

Объектами исследований стали бассейны рек — Малая Северная Двина, Сухона, Юг и Ема (малая река, правый приток Сухоны). В качестве исходной метеорологической информации были использованы данные наземных наблюдений на пяти метеостанциях, расположенных в разных частях бассейна р. Малой Северной Двины (рис. 1), предоставляемые веб-ресурсом www.meteo.ru (официальный сайт ВНИИГМИ—МЦД). Две из них — Вологда и Тотьма — расположены в бассейне р. Сухоны, две другие — Никольск и Опарино — в бассейне р. Юг (см. рис. 1).

Анализ изменений расходов воды выполнен по значениям среднемесячных расходов воды (с ноября по март для зимнего периода и с апреля по май для весеннего) по данным трех гидрологических постов: р. Сухона — д. Каликино (площадь бассейна — 49200 км²), р. Юг — с. Кичменгский городок (площадь — 8890 км²) и р. Ема — д. Новое (площадь — 179 км²). При рассмотрении максимальных уровней воды использовались также данные по уровенному посту в г. Великий Устюг (площадь бассейна — 50300 км²). Рассматриваемый период

составил 58 лет (с 1958 по 2017 г.). Его границы обусловлены, в первую очередь, наличием всех необходимых данных.

Климатические изменения температурно-влажностного режима в исследуемом бассейне

Для четырех бассейнов были проанализированы данные о количестве жидких осадков и температуре воздуха в холодные месяцы (с ноября по март, включительно). Выявлено, что количество дней с положительной температурой увеличивается на протяжении всего рассматриваемого периода, причем наиболее значительно — в феврале и марте (табл. 1). Положительные тренды, рассчитанные по методике, изложенной в [7], являются значимыми даже при уровне значимости $2\alpha = 1\%$ для всех рассмотренных бассейнов.

Таблица 1

Изменение количества безморозных дней в период с 1958 по 2017 г.

Change in the number of frost-free days from 1958 to 2017.

Река—пост	Приращение количества безморозных дней в среднем за период 1988—2017 гг. по сравнению с периодом 1958—1987 гг.					Тренд (дней / 10 лет) / коэффициент детерминации		
	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	1958— 2017	1958— 1987	1988— 2017
р. Ема — д. Новое	0,3	1,0	1,0	2,4	1,8	2,3* / 0,17	1,1 / 0,01	4,1 / 0,15
р. Сухона — д. Каликино	0,9	1,1	0,9	2,1	1,8	2,3 / 0,21	1,3 / 0,02	3,4 / 0,13
р. Юг — с. Кич- менгский Городок	0,6	0,8	0,4	1,3	1,4	1,6 / 0,15	1,1 / 0,02	2,3 / 0,09
р. Сухона — г. Ве- ликий Устюг	0,6	0,9	0,5	1,6	1,4	1,8 / 0,17	1,4 / 0,03	2,7 / 0,11

* — здесь и далее жирным шрифтом выделены тренды с уровнем значимости 5 % и менее.

Сумма жидких осадков за холодные месяцы также возрастает, причем тренд значительно увеличился, начиная с 1988 г. (табл. 2). Тенденция заметна как по максимальным, так и по минимальным их значениям (рис. 2 а). Увеличение количества жидких осадков связано с увеличением количества безморозных дней. В период 1988—2017 гг. (относительно периода 1958—1987 гг.) наибольший рост сумм осадков отмечен в зимние месяцы: в декабре в 2 раза, в январе в 3 раза, в феврале более чем в 7 раз. По абсолютной величине наибольшее увеличение количества осадков наблюдается в марте (разница средних сумм за анализируемые периоды — 3,5 мм), наименьшее — в январе (разница 2,2 мм). Как видно по данным табл. 2 и 3, климатические изменения коснулись в большей степени бассейна р. Сухоны, чем бассейна р. Юг. Необходимо отметить, что согласно [8], при использовании метода деревьев решений для прогнозирования годового стока р. Северной Двины, количество зимних осадков на ст. Великий Устюг является индикатором высокого стока Северной Двины.

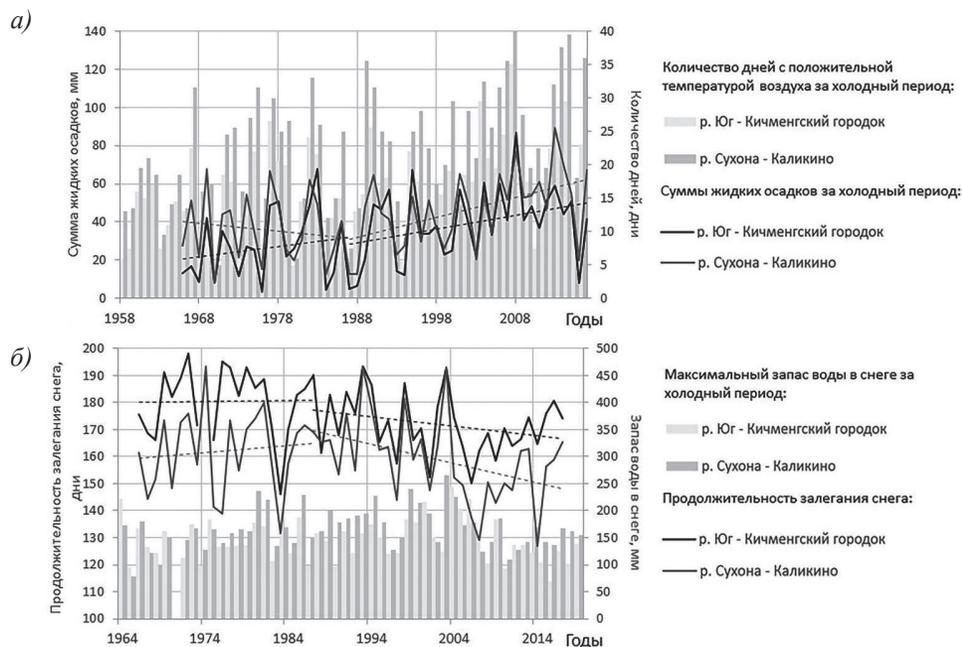


Рис. 2. Многолетние изменения климатических характеристик холодных месяцев (с ноября по март) за периоды 1958—1987 и 1988—2017 гг. в бассейнах рек Сухоны и Юг:

а) суммарное количество дней с положительной температурой воздуха и суммарное количество жидких осадков; б) продолжительность залегания снежного покрова и максимальный запас воды в снежном покрове; крупным и мелким пунктиром обозначены линейные тренды.

Fig. 2. Long-term changes in climatic characteristics of cold months (from November to May) during the 1958—1987 and 1988—2017 periods in the Sukhona and Yug river basins:

а) total amount of days with positive air temperature and total amount of liquid precipitation; б) duration of snow cover existent and maximum values of snow water equivalent; linear trends are depicted by dotted lines.

Таблица 2

Изменение количества жидких осадков в период с 1958 по 2017 г.
 (значимые тренды выделены полужирным шрифтом)

Change in the amount of liquid precipitation during the 1958—2017 period
 (statistically significant trends are in bold)

Период и параметры тренда		р. Ема — д. Новое	р. Сухона — д. Каликино	р. Юг — с. Кич. Городок	р. Сухона — г. Вел. Устюг
1958—2017	Среднее значение, мм	41,3	40,4	32,6	34,4
	Тренд (мм/10 лет)	5,1	5,1	5,0	5,0
	Коэффициент детерминации	0,19	0,21	0,22	0,25

Окончание табл. 2

Период и параметры тренда		р. Ема — д. Новое	р. Сухона — д. Каликино	р. Юг — с. Кич. Городок	р. Сухона — г. Вел. Устюг
До 1987	Среднее значение, мм	33,3	33,2	25,0	27,3
	Тренд (мм/10 лет)	1,2	2,7	4,4	3,7
	Коэффициент детерминации	0,00	0,02	0,06	0,05
С 1988	Среднее значение, мм	49,3	47,5	40,1	41,6
	Тренд (мм/10 лет)	7,6	9,2	5,6	7,9
	Коэффициент детерминации	0,12	0,19	0,07	0,16

В табл. 3 приведен анализ ежегодных данных продолжительности залегания снежного покрова за период 1958—2017 гг., который показал, что наблюдавшаяся до конца 1980-х гг. тенденция к ее увеличению сменилась на обратную (табл. 3 и рис. 2 б). В последние 10 лет продолжительность залегания снега находится на уровне минимальных значений за предшествующий период. Стоит отметить, что изменения, наблюдающиеся в бассейне р. Сухоны, также более значительны, чем в бассейне р. Юг.

Таблица 3

Изменение характеристик снежного покрова в период 1958—2017 гг.
(значимые тренды выделены полужирным шрифтом)

Changes in snow cover characteristics during the 1958—2017 period
(statistically significant trends are in bold)

Река—пост	Тренд максимальных влагозапасов в снежном покрове (мм / 10 лет) за весь период	Продолжительность залегания снега, тренды (дней / 10 лет) / коэффициент детерминации		
		1958—2017	до 1987	с 1988
р. Ема — д. Новое	-2,3	-1,4 / 0,03	3,9 / 0,06	-10,1 / 0,26
р. Сухона — д. Каликино	-2,3	-1,3 / 0,02	2,5 / 0,02	-7,2 / 0,16
р. Юг — с. Кич. Городок	2,8	-1,2 / 0,22	4,9 / 0,10	-2,6 / 0,04
р. Сухона — г. Вел. Устюг	3,1	-1,2 / 0,02	4,1 / 0,07	-5,1 / 0,13

Оценки запасов воды в снеге были проанализированы по данным маршрутных снегомерных съемок (определялись средние значения на основе полевых и лесных снегомерных съемок). В качестве показателя «снежности» зимы был принят максимальный среднемесячный запас воды в снеге. Четко выраженной тенденции его многолетних изменений в бассейне Малой Северной Двины не наблюдается. При этом для бассейна р. Сухоны тренд положительный, а для бассейна р. Юг — отрицательный (табл. 3). Хотя тренды не достигают уровня статистической значимости, изменения нельзя считать незначительными. Так, в бассейне р. Сухоны средний максимальный запас воды в снеге за последние 10 лет (2007—2016 гг.) составил лишь 82 % от среднего за «стабильный» период (1958—1987 гг.).

Изменение характеристик гидрологического режима рек бассейна Малой Северной Двины

Ледовый режим

По данным наблюдений на всех четырех гидрологических постах в последние десятилетия происходит сокращение периода ледостава (табл. 4), наиболее существенное на р. Сухона — д. Каликино (в среднем на 16 дней по сравнению со «стабильным» периодом), а наименее — на р. Ема — д. Новое (на 7 дней). Основной вклад в сокращение продолжительности ледостава, как правило, вносит более позднее формирование ледяного покрова. Дата конца ледостава смещается незначительно на всех рассматриваемых реках, кроме р. Юг (на 5 дней раньше). Согласно [2, 9], формирование мощных заторов у г. Великий Устюг во многом зависит от последовательности вскрытия рек Сухона и Юг. Ситуация, когда р. Юг вскрывается одновременно с р. Сухоной, является наиболее опасной.

Таблица 4

Изменения характеристик ледового покрова на реках за период 1988—2016 гг. по сравнению с периодом 1958—1987 гг. (*значимые тренды выделены полужирным шрифтом*)

Changes in the characteristics of ice cover on rivers for the period of 1988—2016 compared with the 1958—1987 period (*statistically significant trends are in bold*)

Гидрологический пост	Начало ледостава	Конец ледостава	Продолжительность ледостава
р. Ема — Новое	на 5 дней позже	на 2 дня раньше	на 7 дней короче
р. Юг — Кич. Городок	на 5 дней позже	на 5 дней раньше	на 9 дней короче
р. Сухона — Каликино	на 14 дней позже	на 3 дня раньше	на 16 дней короче
р. Сухона — В. Устюг	на 7 дней позже	на 2 дня раньше	на 9 дней короче
Толщина льда: тренд (см/10 лет) / коэффициент детерминации			
	1958—2016	1958—1987	1988—2016
р. Ема — Новое	-0,6 / 0,01	0,6 / 0,05	-7,2 / 0,31
р. Юг — Кич. Городок	-1,6 / 0,11	-0,3 / 0,00	-0,6 / 0,00
р. Сухона — Каликино	-1,5 / 0,04	-0,9 / 0,00	-4,3 / 0,07
р. Сухона — В. Устюг	-4,9 / 0,36	-5,9 / 0,13	-1,67 / 0,03

Максимальная за зиму толщина льда также имеет тенденцию к уменьшению на всех четырех постах. Однако эта тенденция менее выражена для рек Сухоны (г/п Каликино) и Емы из-за большой амплитуды межгодовой изменчивости характеристики. Уменьшение толщины ледяного покрова приводит к тому, что вскрытие рек обеспечивается меньшими по величине расходами воды. Это может способствовать снижению повторяемости заторов [4].

Зимний сток

Рассмотренные выше климатические характеристики входят в число факторов, оказывающих влияние на формирование зимнего стока. Авторами была предпринята попытка оценить его зависимость от этих факторов для трех речных

бассейнов (табл. 5). Из полученных результатов видно, что с достаточной уверенностью можно говорить о связи зимнего стока с рассматриваемыми характеристиками лишь для бассейна р. Емы. Для рек Сухоны и Юг эти коэффициенты корреляции слишком малы и не могут получить конкретной интерпретации. Вероятно, это связано с тем, что малые водосборы быстрее откликаются на климатические изменения, происходящие на их территории (площадь бассейна р. Ема — с. Новое равна 179 км²). Очевидно, что происходящие изменения пока не оказывают заметного влияния на зимний сток средних, а тем более крупных рек.

Многолетний ход величины зимнего стока на реках Сухона, Юг и Ема подтверждает сделанный вывод. Средние зимние расходы р. Емы с 1988 г. имеют тенденцию к увеличению, которая, однако, не имеет статистической значимости из-за большой амплитуды межгодовой изменчивости. Тем не менее, средняя величина зимнего стока за период 1988—2016 гг. в 2 раза больше, чем за период 1958—1987 гг. (0,635 и 0,301 м³/с соответственно). Можно отметить, что в 2006 г. величина зимнего стока достигла своего исторического максимума (2,16 м³/с), почти в 2 раза превысив максимум предшествующего периода (1,12 м³/с).

Таблица 5

Корреляционный анализ влияния климатических факторов на сток рек в зимний и весенний период (r_{prec} , r_{dtmp} , r_{swe} — коэффициенты корреляции стока с количеством жидких осадков, количеством дней с положительной температурой воздуха и запасом воды в снеге, соответственно)

Correlation analysis of the influence of climatic factors on river runoff in winter and spring (r_{prec} , r_{dtmp} , r_{swe} are the correlation coefficients of runoff with the amount of liquid precipitation, the number of days with positive air temperature and snow water equivalent, respectively)

Параметр	Период (месяцы)				Тренд (м ³ /10 лет) за 1958—2016 гг.	
	XI—XII	I—II	III	IV—V	Зимний сток	Весенний сток
р. Ема — с. Новое (179 км ²)						
r_{prec}	0,40	0,32	0,49	—	+0,10 (+21,0 %)*	-0,20 (-3,5 %)
r_{dtmp}	0,37	0,19	0,54	-0,44		
r_{swe}	-0,14	-0,27	-0,22	0,42		
р. Сухона — д. Каликино (49200 км ²)						
r_{prec}	0,19	-0,18	0,06	—	+4,53 (+3,0 %)	-34,2 (-2,9 %)
r_{dtmp}	0,33	-0,09	-0,03	-0,08		
r_{swe}	-0,03	0,01	-0,06	0,38		
р. Юг — с. Кичменгский городок (8890 км ²)						
r_{prec}	0,24	-0,02	-0,12	—	+1,45 (+5,0 %)	-1,18 (-0,5 %)
r_{dtmp}	0,14	-0,03	-0,18	-0,16		
r_{swe}	0,02	0,06	0,10	0,56		

* В скобках указаны величины трендов в процентах от среднего за весь период.

Что касается зимнего стока рек Сухоны и Юг, то его многолетняя изменчивость в целом соответствует циклам водности. Выраженной тенденции, соответствующей климатическим изменениям в бассейне, не наблюдается. Однако для р. Сухоны с 1988 г. наблюдается увеличение повторяемости аномально высокого

зимнего стока. В период 1958—1987 гг. средний за зиму расход превысил 200 м³/с 6 раз, а в период 1988—2014 гг. — в 11 раз. При этом в 2006, 2008, 2009 и 2012 гг. средний за зиму расход воды превысил 300 м³/с, что в предшествующий период наблюдалось с повторяемостью менее, чем 1 раз в 10 лет.

Весенний сток

Вопрос изменения средних величин расходов весеннего половодья не менее важен также в связи с проблемой формирования заторов. Был рассмотрен средний весенний сток рек Сухоны, Юг и Емы (средний расход за апрель и май). Для Емы и Сухоны наблюдается четко выраженная тенденция к уменьшению его величин (табл. 5). Зависимости весеннего стока от количества дней с положительной температурой за зимний период имеют отрицательные коэффициенты корреляции (см. табл. 5). Изменение внутригодового распределения годового стока, а именно увеличение зимней и уменьшение весенней его составляющей, происходит по следующим причинам. Одной из ведущих, очевидно, является уменьшение максимальных запасов воды в снеге, характерное для бассейна р. Сухоны, о котором говорилось выше. Для бассейна р. Юг, где наблюдается незначительное увеличение запаса воды в снеге, выраженной тенденции к уменьшению весенних расходов нет (хотя нет и тенденции к их увеличению). Одновременно с увеличением зимних осадков происходит увеличение количества дней с оттепелями (дней с положительной температурой воздуха) в холодный период, что способствует частичному стаиванию накопленного снежного покрова, пополнению грунтового стока и уменьшению стока весеннего половодья. Эта тенденция наиболее явно выражена в настоящее время на водосборах небольших размеров.

Максимальные уровни весеннего половодья

Значимых трендов изменения максимальных весенних уровней за период нестабильности климата (1988—2017 гг.) на рассмотренных реках не наблюдается. Однако можно выделить некоторые тенденции.

На р. Сухоне (г/п Каликино) наблюдается уменьшение максимальных весенних уровней, что соответствует отмеченной выше тенденции к сокращению объема весеннего стока. При этом в данном створе в последние годы увеличилась амплитуда межгодовой изменчивости и участились случаи превышения отметки 8 м уровня воды. В гидростворах р. Юг — Кичменгский городок и р. Сухона — г. Великий Устюг наблюдается противоположная ситуация: там максимальные уровни воды весеннего половодья имеют тенденцию к увеличению. Объяснение этому можно найти в том, что максимальные уровни весеннего половодья в них достаточно часто одновременно являются и заторными уровнями. Заторы продолжают оставаться значимой характеристикой гидрологического режима рек Севера ЕТР.

Согласно исследованиям, проводившимся в ФГБУ «Государственный гидрологический институт» под руководством В.А. Бузина [4, 9], максимальные заторные уровни зависят от расхода воды и температуры воздуха при вскрытии реки, максимального уровня в начале ледостава, толщины ледяного покрова. Как

показали результаты работы [9], за период нестабильного климата детерминированные вклады этих факторов в процесс затороформирования в бассейне Малой Северной Двины значительно изменились. Усилилась зависимость максимального заторного уровня от максимального уровня при установлении ледостава. Коэффициенты корреляции между ними на р. Сухоне составили: 0,66 у с. Каликино и 0,56 у г. Великий Устюг.

Уровни воды в начале ледостава — многофакторная характеристика. Их значения зависят как от метеорологических условий — температуры воздуха и осадков в осенне-зимний период, так и от гидравлично-морфометрических особенностей речного участка. Уровни в этот период во многом определяются наличием в русле реки внутриводного льда (шуги). Интенсивность образования шуги в свою очередь зависит от соотношения между скоростью потока и температурой воздуха в период замерзания реки. Наиболее благоприятными условиями для процесса шугообразования являются оттепели с выпадением жидких осадков в период замерзания, приводящие к увеличению скорости потока [4].

С наблюдаемой устойчивой тенденцией к увеличению количества оттепелей значительно возрастает вероятность замерзания рек с шугоходом и образованием зажоров. Об этом свидетельствует значительный сдвиг дат начала ледостава на р. Сухоне (в среднем на 14 дней позже). В качестве примера последствий неустойчивого температурного режима в начале зимы можно привести последнее выдающееся наводнение в г. Великий Устюг в 2016 г., когда основным фактором, повлиявшим на формирование затора, стала значительная зашугованность русла, сохранявшаяся до начала марта [1].

Обсуждение полученных результатов

Наблюдаемые изменения факторов формирования заторов имеют разнонаправленное влияние: с одной стороны, повышение температуры воздуха способствует уменьшению продолжительности ледостава и толщины ледяного покрова, с другой стороны, осенние оттепели способствует повышению уровней воды в предледоставный период за счет образования зажоров, что приводит к повышению вероятности образования заторов весной. Уменьшение максимальной толщины льда способствует снижению повторяемости и мощности заторных явлений [4]. Увеличение количества теплых дней в ноябре—декабре, из-за которых происходит замерзание по зажорному типу, приводит к противоположному результату [9]. Поэтому достаточно сложно дать объективную оценку изменений вероятности и высоты максимальных заторных уровней, которые могут наблюдаться в будущем. Не стоит также забывать о необходимости проведения противозаторных мероприятий, включающих текущее строительство противозаторных сооружений, в исследуемом регионе.

В результате наблюдаемых климатических изменений предшествуют установлению ледостава длительные густые шугоходы и формирование зажоров, которые способствуют образованию заторов при весеннем вскрытии рек. В последние десятилетия максимальные уровни в начале ледостава стали ведущим

фактором в процессе заторообразования, особенно в узле рек Сухона—Юг (г. Великий Устюг).

Как показывают модельные расчеты, проведенные в рамках современных представлений о будущем изменении климата в XXI в. [10—15], гидроклиматический режим р. Северной Двины в ближайшие десятилетия по своим основным параметрам будет близок 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 и ледового покровов и речного стока сохранятся. При этом относительная доля зимнего стока в годовом стоке, вероятно, будет незначительно увеличиваться, а весеннего — уменьшаться.

По мнению авторов, вероятность образования ледовых заторов в результате текущих и возможных будущих гидроклиматических изменений в бассейне не снижается.

Основные выводы

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

— в бассейне р. Малой Северной Двины в последние 30 лет происходит значимое увеличение количества жидких осадков и дней с положительной температурой воздуха в холодный период года (с ноября по март);

— в бассейне р. Малой Северной Двины отмечается сокращение периода залегания снежного покрова; в бассейне р. Сухоны уменьшаются максимальные значения запаса воды в снежном покрове, тогда как в бассейне р. Юг, наоборот, наблюдается их незначительное увеличение;

— на реках бассейна Малой Северной Двины сокращается период ледостава и уменьшается максимальная за год толщина льда; на р. Сухоне даты начала ледостава значительно сдвигаются в сторону более поздних;

— происходящие климатические изменения в исследуемом речном бассейне способствуют перераспределению стока внутри года: увеличивается зимний сток и уменьшается весенний, что отчетливо прослеживается на малых реках и менее явно на средних и крупных;

— в бассейне р. Сухоны происходит уменьшение средних весенних расходов, во многом за счет уменьшения запаса воды в снежном покрове;

— в последние десятилетия максимальные заторные уровни не всегда являются наивысшими годовыми уровнями, но при этом вероятность возникновения ледовых заторов не уменьшается, несмотря на происходящее потепление климата.

Авторы полагают, что полученные выводы позволят адаптировать существующие методики прогноза заторных наводнений к изменяющимся условиям.

Список литературы

1. Георгиевский М.В., Горошкова Н.И., Полякова В.С., Голованов О.Ф., Георгиевский Д.В., Скрипник Е.Н. Условия формирования и полевые исследования ледового затора, послужившего

- причиной наводнения на р. Сухона у г. Великий Устюг весной 2016 г. // *ГЕОРИСК*. 2017. № 4. С. 40—48.
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. № 2. С. 82—90.
 3. *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.
 4. *Бузин В.А.* Заторы и заторы льда на реках России. СПб.: ГГИ, 2015. 240 с.
 5. *Горошкова Н.И., Георгиевский М.В., Георгиевский Д.В., Стриженко А.В., Сумачев А.Э.* Многолетние данные по характерным уровням и расходам воды, максимальным и минимальным ежемесячным уровням и максимальной толщине льда рек бассейна Северной Двины до г. Котласа. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2019621036. М.: Роспатент, 2019.
 6. *Агафонова С.А., Фролова Н.Л.* Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины // *Водные ресурсы*. 2006. Т. 33, № 6. С. 1—9.
 7. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 160 с.
 8. *Гордеева С.М., Малинин В.Н.* О предвычислении годового стока крупных рек Европейской территории России на основе метода деревьев решений // *Ученые записки РГГМУ*. 2018. № 50. С. 53—65.
 9. *Бузин В.А., Горошкова Н.И., Стриженко А.В., Палкина Д.А.* Зависимости для прогнозов максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины и влияние на них климатических и антропогенных факторов // *Ученые записки РГГМУ*. 2014. № 36. С. 12—21.
 10. *Георгиевский М.В., Голованов О.Ф.* Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта СМIP5 // *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2019. Т. 64. Вып. 2. С. 206—219.
 11. *Кокарев В.А., Шерстюков А.Б.* О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России // *Арктика XXI век. Естественные науки*. 2015. № 2(3). С. 5—23.
 12. *Анисимов О.А., Кокарев В.А.* Климат в арктической зоне России: анализ современных изменений и модельные проекции на XXI век // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2016. № 1. С. 61—69.
 13. *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 (СМIP5) // *Труды ГГО*. 2013. Вып. 569. С. 75—97.
 14. *Кислов А.В., Гребенец В.И., Евстигнеев В.М., Конищев В.Н., Сидорова М.В., Суркова Г.В., Тумель Н.В.* Последствия возможного потепления климата в XXI веке на севере Евразии // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2011. № 3. С. 3—8.
 15. *Школьник, И.М., Мелешко, В.П., Кароль И.Л., Киселев А.А., Надежина Е.Д., Говоркова В.А., Павлова Т.В.* Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке // *Труды ГГО*. 2014. Вып. 575. С. 65—118.

References

1. *Georgievsky M.V., Goroshkova N.I., Polyakova V.S., Golovanov O.F., Georgievsky D.V., Skripnik E.N.* Formation conditions and field surveys of an ice jam formed near the town of Velikiy Ustyug and caused a catastrophic flood in spring 2016. *GEORISK*. 2017, 4: 40—48. [In Russian].
2. *Agafonova S.A., Vasilenko A.N., Frolova N.L.* The factors of ice jams formation on the rivers of the Northern Dvina basin in modern conditions. *Vest. MGU. Ser. 5. Geografiya*. MSU Vestnik. Series 5. Geography. 2016, 5: 82—90. [In Russian].
3. *Georgievsky V.Yu., Koronkevich N.I., Alekseevsky N.I.* Water resources and hydrological regime of the Russian rivers under climate change. *Plenarnye doklady VII Vserossiiskogo gidrologicheskogo s'ezda, 19—21 noiabria 2013 g.* Plenary reports of the VII All-Russian hydrological Congress, November 19—21, 2013. St. Petersburg: SHI, 2014: 79—102. [In Russian].

4. Buzin V.A. Zazhory i zatory l'da na rekakh Rossii. Ice dams and ice jams on the rivers of Russia. St. Petersburg: SHI, 2015: 240 p. [In Russian].
5. Goroshkova N.I., Georgievsky M.V., Georgievsky D.V., Strizhenok A.V., Sumachev A.E. *Mnogoletnie dannye po kharakternym urovnyam i raskhodam vody, maksimal'nyim i minimal'nyim ezhemesyachnym urovnyam i maksimal'noj tolshchine l'da rek bassejna Severnoj Dviny do g. Kotlasa*. Long-term data on characteristic water levels and discharges, maximum and minimum monthly levels and maximum ice thickness of the rivers of the Northern Dvina basin up to the town of Kotlas. Moscow: Rospatent, 2019.
6. Agafonova S.A., Frolova N.L. Features of the ice regime of the rivers of the Northern Dvina basin. *Vodnye resursy*. Water resources. 2006, 33 (6): 1—9. [In Russian].
7. *Metodicheskie rekomendacii po ocenke odnorodnosti gidrologicheskikh harakteristik o opredeleniyu ih raschetnykh znachenij po neodnorodnym dannym*. Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values from heterogeneous data. St. Petersburg: Nestor-History, 2010: 160 p. [In Russian].
8. Buzin V.A., Goroshkova N.I., Strizhenok A.V., Palkina D.A. Dependencies used for forecasting maximum ice—jam stages of the Sukhona river, the southern part of Northern Dvina and the Small Northern Dvina and influence of climatic and anthropogenic factors on them. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of RSMU. 2014, 36: 12—21. [In Russian].
9. Georgievsky M.V., Golovanov O.F. Forecasting changes in river water resources of Russian Federation based on CMIP5 runoff data. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle*. Vestnik SPbSU. Earth Sciences. 2019, 64 (2): 206—219. [In Russian].
10. Gordeeva S.M., Malinin V.N. On predicting annual runoff of large rivers of European Russia based on decision trees method. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of RSMU. 2018, 50: 53—65. [In Russian].
11. Kokorev V.A., Sherstiukov A.B. Meteorological data for studying the current and projected for the future climate change in Russia. *Arktika. XXI vek. Estestvennye nauki*. Arctic. XXI century. Earth Sciences. 2005, 2 (3): 5—23. [In Russian].
12. Anisimov O.A., Kokorev V.A. Climate in the Arctic zone of Russia: analysis of current changes and modeling trends for the XXI century. *Vest. MGU. Ser. 5. Geografiya*. MSU Vestnik. Series 5. Geography. 2016, 1: 61—69. [In Russian].
13. Kattsov V.M., Govorkova V.A. Expected surface air temperature, precipitation and annual runoff changes over the territory of Russia: projections with an ensemble of global climate models (CMIP5). *Trudy GGO*. Proc. MGO. 2013, 569: 75—97. [In Russian].
14. Kislov A.V., Grebenets V.I., Evstigneev V.M., Konishchev V.N., Sidorova M.V., Surkova G.V., Tumel N.V. The consequences of possible climate warming in the XXI century in the north of Eurasia. *Vest. MGU. Ser. 5. Geografiya*. MSU Vestnik. Series 5. Geography. 2011, 3: 3—8. [In Russian].
15. Shkolnik I.M., Meleshko V.P., Karol I.L., Kiselev A.A., Nadyozhina E.D., Govorkova V.A., Pavlova T.V. Expected climate change on the territory of the Russian Federation in the XXI century. *Trudy GGO*. Proc. MGO. 2014, 575: 65—118. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 21.05.2021

Принята к публикации после доработки 05.08.2021

Сведения об авторах

Георгиевский Михаил Владимирович, канд. геогр. наук, руководитель отдела подготовки кадров ФГБУ «ГГИ», mgeorgievsky@hotmail.com.

Горошкова Наталья Ивановна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальных исследований ФГБУ «ГГИ», goroshnat@yandex.ru.

Георгиевский Дмитрий Владимирович, научный сотрудник лаборатории экспериментальных гидрологических исследований и математического моделирования отдела прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальных исследований, dmivlge@gmail.com.

Хомякова Виктория Андреевна, студентка I курса магистратуры Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, sursuma162@gmail.com.

Пленкина Анастасия Константиновна, студентка IV курса бакалавриата кафедры гидрологии суши Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, akuloda@mail.ru.

Information about authors

Georgievsky Mikhail Vladimirovich, PhD (Geogr. Sci.), Head of the Personnel Training Department of the Federal State Budgetary Institution «State Hydrological Institute».

Goroshkova Natalia Ivanovna, PhD (Tech. Sci.), Senior Researcher of the Department of Forecasting of Hydrological Processes and Experimental Research of the Federal State Budgetary Institution «State Hydrological Institute».

Georgievsky Dmitry Vladimirovich, Researcher of the Laboratory of Experimental Hydrological Research and Mathematical Modeling of the Department of Forecasting of Hydrological Processes and Experimental Research of the Federal State Budgetary Institution «State Hydrological Institute».

Victoria A. Khomyakova, 1st-year master's student of the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University.

Anastasia K. Plenkina, 4th-year undergraduate student of the Department of Land Hydrology of the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University.