

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 435—452.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):435—452.

Научная статья
УДК [556.535:551.583](282.247.11)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-435-452

Влияние изменения климата на экстремальные гидрологические характеристики в бассейне реки Печоры

Владимир Алексеевич Лобанов¹, Наталия Ивановна Горошкова², Анастасия Владимировна Стриженок², Дарья Артемиевна Семенова²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, lobanov@EL6309.spb.edu

² Государственный гидрологический институт, goroshnat@yandex.ru

Аннотация. Многолетние ряды высших и низших уровней воды и характеристик ледового режима рек бассейна Печоры аппроксимируются моделями нестационарного среднего с целью выявления влияния современного изменения климата. Разработана методика оценки эффективности и устойчивости моделей нестационарного среднего. Установлено, что высшие уровни воды весеннего половодья (высшие в году, высшие периода ледохода, высшие заторные уровни) пока еще не подвержены этим изменениям в виду высокой естественной изменчивости и большой зависимости от локальных факторов. Характеристики ледовых явлений, такие как максимальная толщина льда, даты начала, окончания, продолжительность ледостава, а также минимальные уровни воды открытого русла уже имеют другие средние значения в 1990—2000-х годах в связи с влиянием климатических изменений.

Ключевые слова: опасные гидрологические характеристики, уровни воды, ледовые явления, многолетние ряды, бассейн Печоры, изменение климата, статистические модели.

Для цитирования: Лобанов В. А., Горошкова Н. И., Стриженок А. В., Семенова Д. А. Влияние изменения климата на экстремальные гидрологические характеристики в бассейне реки Печоры // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 435—452. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-435-452.

Original article

Impact of climate change on extreme hydrological characteristics in the Pechora river basin

Vladimir A. Lobanov¹, Natalia I. Goroshkova², Anastasia V. Strizhenok², Darja A. Semenova²

¹ Russian State Hydrometeorological University, lobanov@EL6309.spb.edu

² State Hydrological Institute, goroshnat@yandex.ru

Summary. Long-term time series of the highest and lowest water levels and characteristics of the ice regime of the rivers in the Pechora basin are approximated by non-stationary average models (linear trend and mean step change model) in order to identify the impact of modern climate change. On the Pechora River

© Лобанов В. А., Горошкова Н. И., Стриженок А. В., Семенова Д. А., 2022

and its main tributaries (the rivers Usa, Kolva, Izhma, Tsilva, Pizhma, Sula), 21 hydrological gauged sites were selected with different catchment areas and observation periods. The following were considered as the highest water levels: the highest annual water levels, which were always observed during the snowmelt period; the highest levels of spring ice drift and higher jam levels, which did not occur every year. In the second group of «slow inertial» characteristics, selected were the low water levels of the open low water channel, attributed to the summer-autumn period, and such characteristics of the ice regime as maximum ice thickness, dates of the beginning, the end and the duration of freeze-up. A method for estimating the efficiency and stability of the parameters of non-stationary mean models has been developed. It has been obtained that the highest water levels of the spring flood (maximum in the year, the period of ice drift, jam levels) are not yet subject to these changes due to high natural variability and great dependence on local factors. More inertial characteristics of ice events, such as maximum ice thickness, dates of beginning, end and duration of freeze-up, as well as minimum open channel water levels, have already changed their average values in the 1990—2000s due to the impact of climate change. The greatest changes took place in the maximum ice thickness, which is well related to such a climatic factor as the sum of negative temperatures, in half of the cases these changes exceeding the standard deviation of natural variability and the decrease in the maximum ice thickness ranging from 7—8 to 22—28 cm in different sites. The dates of the beginning of freeze-up shifted towards the end of the year and became later by an average of 8 days, the dates of the end of the ice period on the rivers starting earlier by an average of 3 days, which as a result reduced the duration of freeze-up by 11 days. Even though these changes account for 5—8% of the total duration of the ice period on rivers, they are statistically significant in most cases.

Keywords: hazardous hydrological characteristics, water levels, ice phenomena, long-term series, Pechora basin, climate change, statistical models.

For citation: Lobanov V. A., Goroshkova N. I., Strizhenok A. V., Semenova D. A. Impact of climate change on extreme hydrological characteristics in the Pechora river basin. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):435—452. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-435-452.

Введение

Основную опасность в бассейне р. Печоры представляют мощные заторы льда, высшие уровни воды которых одновременно являются и высшими годовыми. Происходящие при заторах затопления пойм, расположенных на них населенных пунктов и объектов инфраструктуры приводят к большим материальным ущербам. Исследованию характеристик ледовых явлений на реках севера Европейской территории России (ЕТР), влиянию на них изменений климата и методам их прогнозов посвящены многочисленные работы российских ученых [1—6].

Экстремальные гидрологические характеристики, такие как высшие и низшие уровни воды, а также характеристики ледовых явлений (даты начала, окончания, продолжительность ледостава и наибольшая толщина льда) влияют на водоснабжение, затопление территорий, функционирование гидротехнических сооружений, зимников и многие другие виды жизненной и хозяйственной деятельности.

По генезису формирования и инерционности процессов их можно разделить на два класса:

— «быстрые», к которым относятся высшие уровни воды весеннего половодья, дождевых паводков, заторные уровни, наблюдающиеся, как правило, в течение короткого времени;

— «медленные инерционные» — это характеристики ледовых явлений: продолжительность ледостава, даты его начала и окончания, максимальные толщины

льда, а также низшие летние и зимние уровни воды, как предельные значения многодневных кривых истощения стока в эти сезоны.

Можно априори предположить, что влияние современного изменения климата на эти две разные группы опасных явлений будет также разным. Высшие уровни в большей степени зависят от местных или локальных факторов (особенности пропускной способности русла на участке и в створе, кинематические свойства потока и т.д.), чем от более инерционных, климатических. Это проявляется и в более высоких коэффициентах вариации и асимметрии эмпирических распределений высших расходов и уровней воды по сравнению, например, со среднегодовыми и среднемесячными аналогичными характеристиками [7—10]. Также в национальных оценочных докладах об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации отмечается, что существенные изменения имеют место в минимальном и годовом стоке, а в максимальных расходах воды они практически отсутствуют [11—15].

Отклик характеристик ледового режима на изменения климата обусловлен в основном инерционностью данного вида криосферы, и поэтому изменения происходят не сразу, а с некоторым запаздыванием. И этот период запаздывания в проявлении влияния изменения климата зависит от локальных особенностей створа и конкретного участка русла. Поэтому годы начала реакции на климатические изменения в характеристиках ледового режима в разных пунктах наблюдений могут отличаться. Аналогичная ситуация имеет место также в низших расходах и уровнях воды, где год начала их изменений зависит от инерционности процесса истощения поверхностных и подземных вод, связанного с особенностями конкретного водосбора.

Если рассматривать общую концепцию совместного влияния зональных и азональных факторов [16,17], то на высшие уровни воды оказывают преимущественное влияние азональные факторы, а на характеристики ледового режима и низшие уровни влияют как зональные (климатические), так и азональные факторы.

Еще одна особенность изменений в гидрологических характеристиках — это ступенчатый или резкий переход от одних стационарных условий к другим, что наглядно иллюстрируется в работах [11, 12]. Аналогичные резкие изменения в метеорологических характеристиках обусловлены ростом интенсивности индекса Северо-Атлантического колебания в конце 1980-х годов [18, 19]. Поэтому помимо наиболее распространенных в настоящее время моделей трендов при аппроксимации временных рядов следует применять и модель ступенчатых изменений.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы оценить, как современное изменение климата приводит к изменению средних значений многолетних рядов экстремальных характеристик уровня режима в пунктах наблюдений на р. Печоре и ее основных притоках.

Исходные данные

На р. Печоре и ее основных притоках (реки Уса, Колва, Ижма, Цильма, Пижма, Сула) был выбран 21 гидрологический пост с различными площадями водосборов

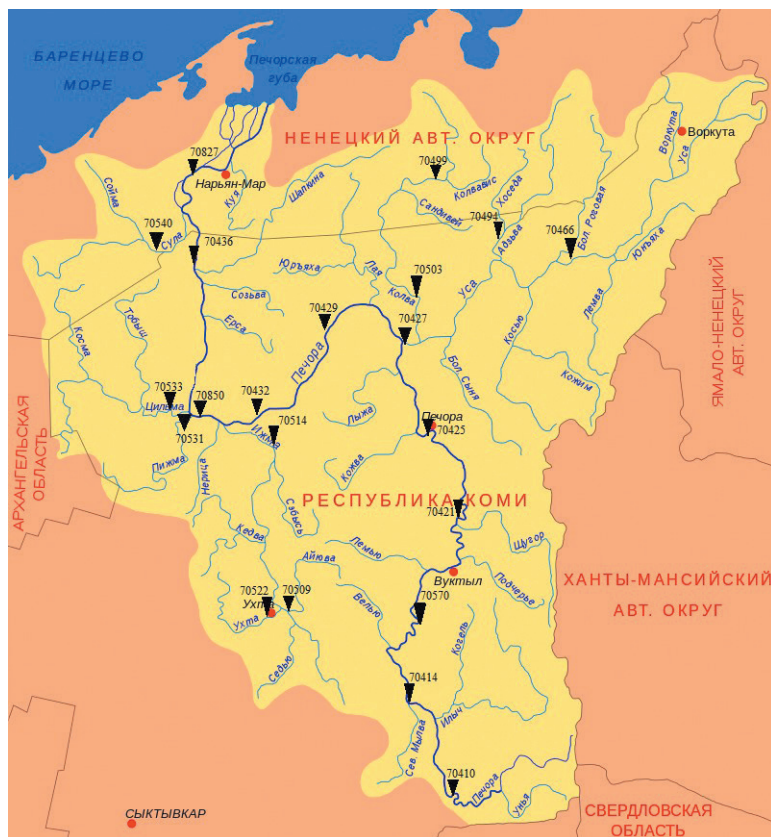


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений в бассейне р. Печоры.

Fig.1. Scheme of location of observation sites in the basin of the Pechora River.

и периодами наблюдений. Схема размещения пунктов наблюдений с кодами ГVK (Государственного водного кадастра) приведена на рис. 1.

Основные характеристики пунктов и водосборов (F — площадь водосбора в км²; $L_{уст.}$, $L_{ист.}$ в км — расстояние пункта от устья и истока реки), а также периоды и продолжительности наблюдений (n в годах) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики пунктов и периодов наблюдений в бассейне Печоры
 Characteristics of sites and observation periods in the Pechora basin

Код ГVK	Река — пункт	F , км ²	$L_{уст.}$, км	$L_{ист.}$, км	Период	n , лет
70410	р. Печора — д. Якша	9620	1506	303	1914—2019	106
70414	р. Печора — с. Троицко-Печорск	35600	1359	450	1936—2019	84
70570	р. Печора — пос. Шедрино	42500	1201	608	1978—2019	42
70421	р. Печора — с. Усть-Шугор	67500	1036	773	1914—2019	103

Код ГВК	Река — пункт	F , км ²	$L_{уст.}$, км	$L_{ист.}$, км	Период	n , лет
70425	р. Печора — д. Усть-Ковжа	74600	872	937	1914—2019	96
70427	р. Печора — с. Усть-Уса	188000	754	1055	1948—2019	72
70429	р. Печора — д. Мутный Материк	205000	610	1199	1933—2019	86
70432	р. Печора — д. Шельяюр	212000	479	1330	1934—2019	86
70850	р. Печора — с. Усть-Цильма	248000	425	1384	1932—2019	88
70436	р. Печора — с. Ермицы	295000	236	1573	1935—2019	87
70827	р. Печора — с. Оксино	312000	141	1668	1917—2019	90
70466	р. Уса — с. Петрунь	27500	259	306	1916—2019	100
70494	р. Адзьва — д. Харуга	8700	46	288	1960—2019	60
70499	р. Колва — с. Хорей-Вер	5470	326	239	1959—2019	60
70503	р. Колва — с. Усть-Колва	18000	6.1	558	1998—2019	21
70509	р. Ижма — с. Усть-Ухта	15000	316	215	1914—2019	90
70514	р.Ижма — с. Ижма	28700	79	452	1930—2019	90
70522	р. Ухта — г. Ухта	4290	13	186	1934—2019	86
70531	р. Пижма — д. Боровая	4890	53	230	1937—2019	82
70533	р. Цильма — с. Трусово	20900	54	320	1958—2019	62
70540	р. Сула — д. Коткино	8500	101	252	1929—2019	91

Как следует из данных табл. 1, площади водосборов варьируются в очень широких пределах от 4290 км², для р. Ухты — г. Ухта, до 312 000 км², для р. Печоры — с. Оксино, причем половина пунктов находится на р. Печоре, а половина на ее притоках. Периоды наблюдений также существенно разнятся: от 21 года (на р. Колве у с. Усть-Колва) до 106 лет (на р. Печоре у д. Якша), но последний год наблюдений во всех пунктах — 2019.

В качестве высших уровней воды рассматривались: высшие в году уровни воды (H_{\max} в см над «0» поста), которые всегда наблюдались в период весеннего половодья; высшие уровни весеннего ледохода ($H_{\text{лдж}}$ в см над «0» поста), а также высшие заторные уровни ($H_{\text{затоп}}$ в см над «0» поста), которые имели место не каждый год. Высшие уровни при заторе могут наблюдаться как при наибольшем уровне весеннего ледохода, так и за несколько дней до его наступления, что зависит от условий формирования весеннего половодья конкретного года. Иногда вскрытие реки проходит без образования заторов льда.

Во второй группе «медленных инерционных» характеристик были выбраны низшие уровни воды открытого русла (H_{\min} в см над «0» поста), которые приходились на летне-осеннюю межень, и такие характеристики ледового режима как: максимальная толщина льда (h_{\max} в см), даты начала ($T_{\text{нач}}$ в днях от начала года), окончания ($T_{\text{кон}}$ в днях от начала года) и продолжительность ледостава ($T_{\text{лед}}$ в днях).

В связи с тем, что коэффициенты корреляции между многолетними рядами одних и тех же характеристик были низкими (менее 0,5—0,6), приведение непродолжительных рядов и восстановление пропусков наблюдений в соответствии с методикой, основанной на регрессионных зависимостях с продолжительными

рядами в пунктах — аналогах, осуществить не удалось [20]. Поэтому весь анализ и моделирование основано только на наблюдаемых данных.

Для сформированных баз данных многолетних рядов рассматриваемых гидрологических характеристик осуществлена оценка однородности экстремумов эмпирических распределений по статистическим критериям Диксона и Смирнова—Граббса [21, 22], и неоднородные экстремумы были исключены из рядов наблюдений.

Методика исследований

В соответствии с поставленной целью по выявлению проявления современных изменений климата в многолетних рядах опасных гидрологических характеристик были применены методы статистического оценивания и моделирования [21—23]. Проверялась гипотеза о том, какая из моделей является наиболее эффективной: модель стационарного среднего или модель нестационарного среднего, которая была представлена линейным трендом и моделью ступенчатых переходов от одного стационарного режима к другому. Очевидно, что если значимых статистических различий между стационарной и нестационарной моделями при аппроксимации временного ряда нет, то современное изменение климата пока не проявляется в динамике рассматриваемой гидрологической характеристики.

Описание моделей нестационарного среднего, параметров их эффективности и многочисленные примеры применения приведены, например, в работах [18, 19, 24—27]. В качестве основных показателей нестационарных моделей используются: r — коэффициент корреляции рассматриваемой гидрологической характеристики со временем и Δ — относительная разность средних квадратических отклонений остатков моделей стационарного среднего (σ_y), равного СКО (среднее квадратическое отклонение) и нестационарного (σ_e) среднего (в %), определяемая по формуле:

$$\Delta = (\sigma_y - \sigma_e) / \sigma_y \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\Delta = \Delta_{\text{тр}}$ или $\Delta = \Delta_{\text{ст}}$ — соответствующие относительные разности или показатели эффективности для моделей линейного тренда и ступенчатых изменений; σ_y — среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений.

При аппроксимации временного ряда моделью ступенчатых изменений итерациями определяется год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{\text{ст}}$) при достижении минимума суммы квадратов отклонений от каждого стационарного среднего двух частей временного ряда [19, 24].

В данном исследовании применяется методика оценки не только эффективности статистических моделей нестационарного среднего, но устойчивости во времени вида модели и года перехода от одних стационарных условий к другим. Алгоритм оценки эффективности и устойчивости параметров нестационарных моделей состоит в следующем:

— моделями нестационарного среднего аппроксимируется временной ряд за весь период наблюдений и предварительно оценивается их эффективность и год перехода от одних стационарных условий к другим;

— если показатели модели нестационарного среднего эффективны, то оценивается, какая из двух моделей лучше (имеет большее отличие от стационарной модели): линейного тренда или ступенчатых изменений путем сравнения $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$;

— для оценки устойчивости показателей эффективности нестационарных моделей (r , $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$) и года перехода ($T_{\text{ст}}$) временной ряд аппроксимируется моделями тренда и ступенчатых изменений за разные интервалы времени при постепенном сдвиге года начала ряда от прошлого к настоящему;

— выбирается наиболее часто повторяющийся год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{\text{стр}}$) и временной ряд по этому году делится на две части;

— оценивается статистическая значимость коэффициента корреляции (r) со временем для каждой части временного ряда (до и после года перехода $T_{\text{ст}}$) с целью оценки вида модели для каждой части временного ряда (стационарная или тренд);

— рассчитываются средние значения для каждой части временного ряда ($x_{\text{ср1}}$ и $x_{\text{ср2}}$) и оценивается их стационарность на основе статистического критерия Стьюдента [21];

— для количественной оценки влияния изменений климата рассчитывается разность между средними значениями ($\Delta x_{\text{ср}} = x_{\text{ср2}} - x_{\text{ср1}}$) и сопоставляется со средним квадратическим отклонением всего ряда (σ), которое характеризует естественную климатическую изменчивость.

Результаты и их обсуждение

В качестве примера всю последовательность моделирования и оценки устойчивости во времени показателей нестационарности продемонстрируем для низших в году уровней воды летне-осеннего периода ($H_{\text{мин}}$).

Результаты расчетов показателей эффективности моделей нестационарного среднего (r , $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$) и года перехода ($T_{\text{ст}}$) приведены в табл. 2 для разных лет начала временных рядов: весь период с года начала наблюдений (В), с 1960-го г. (1960), с 1980-го (1980) и с 2000-го (2000), а также отдельно рассмотрен период с начала наблюдений по 1960 г. (до 1960), коды постов даны в виде последних трех цифр. В этой таблице жирным шрифтом выделены эффективные нестационарные модели при $\Delta > 10\%$ и статистически значимые коэффициенты корреляции r при уровне значимости $\alpha = 5\%$. Также приведены наиболее вероятные годы начала нестационарности $T_{\text{стр}}$ для эффективных нестационарных моделей. В последней строке табл. 2 даны средние значения («сред») по всем рядам.

Таблица 2

Оценка устойчивости во времени показателей эффективности нестационарных моделей низших уровней воды летне-осенней межени рек бассейна Печоры

Estimation of stability in time of efficiency indicators of non-stationary models of low water levels in summer-autumn period of rivers in the Pechora basin

код	$\Delta_{\text{тр}}, \%$				$\Delta_{\text{ст}}, \%$			r				$T_{\text{ст}}$				
	В	1960	1980	2000	В	1960	1980	В	До 1960	1960	1980	2000	В	1960	1980	$T_{\text{стр}}$
425	15,0	1,2	7,7	0,3	18,3	6,9	15,3	-0,50	-0,20	-0,20	0,38	0,07	70	72	94	94
427	0,1	0,1	0,4	2,0	1,1	1,4	2,4	0,04	-0,22	0,05	0,09	0,20	00	00	00	—

код	$\Delta_{тр}, \%$				$\Delta_{ст}, \%$			r				$T_{ст}$				
	В	1960	1980	2000	В	1960	1980	В	До 1960	1960	1980	2000	В	1960	1980	$T_{ст}$
410	2,4	0,7	0,0	0,8	3,9	2,6	1,5	0,22	-0,08	0,12	0,02	0,13	78	78	03	—
436	6,5	3,3	0,8	2,5	7,2	5,0	4,3	0,35	0,08	0,25	0,12	-0,20	79	79	94	94
414	6,5	0,4	0,1	3,9	10,6	1,6	1,5	0,35	0,09	0,09	0,03	0,28	65	73	97	65
432	0,0	0,2	0,1	0,0	0,6	0,9	4,6	0,02	0,05	0,07	0,05	0,02	09	09	94	94
570	0,6	0,6	3,5	0,8	5,0	5,0	10,5	0,11		0,11	0,26	0,12	94	94	94	94
421	0,6	0,0	0,2	0,0	1,8	1,6	2,9	0,11	-0,14	0,02	0,06	0,03	62	09	09	—
429	1,2	0,2	11,5	3,5	2,6	2,4	12,8	0,16	0,02	0,06	0,46	0,26	02	02	94	94
466	1,7	0,4	1,1	0,0	3,3	1,7	1,0	-0,20	-0,15	0,09	0,15	0,0	53	87	00	—
494	0,2	0,2	0,1	0,6	0,9	0,9	0,9	0,07	-0,15	0,07	0,15	0,11	84	84	09	—
499	4,8	4,5	5,6	0,1	6,7	6,5	7,7	0,30		0,30	0,33	0,04	95	95	02	95
509	5,0	5,3	1,6	0,0	7,0	7,3	3,8	0,31	-0,15	0,32	0,18	0,02	78	78	94	94
514	12,1	6,8	7,1	2,3	11,3	9,8	10,8	0,48	0,31	0,36	0,37	0,21	94	94	94	94
522	11,9	40,9	29,4	16,0	22,0	32,0	22,6	0,47	-0,50	0,81	0,71	0,54	93	93	93	93
531	1,0	0,0	0,5	0,8	2,0	0,9	1,1	0,14	0,22	0,00	0,10	0,12	56	72	94	—
533	0,6	0,4	0,9	1,0	2,0	1,9	2,9	0,11		0,09	0,13	0,14	07	07	07	—
540	1,0	0,1	10,0	4,1	4,0	6,3	13,7	0,14	-0,10	0,06	-0,40	-0,30	78	09	09	78
827	7,4	1,5	2,2	1,7	7,4	3,0	4,1	0,38	0,13	0,17	0,21	0,18	62	95	95	—
850	2,0	0,0	0,0	0,0	3,7	1,2	2,4	0,20	0,15	0,01	0,03	0,02	62	09	09	—
сред	3,9	3,2	4,0	2,0	5,8	4,7	6,0	0,16	0,12	0,14	0,17	0,10				

Как следует из результатов табл. 2, из 20 анализируемых рядов наблюдений за низшими уровнями воды летне-осенней межени эффективные нестационарные модели имеют место почти для половины рядов или от трех до восьми рядов в зависимости от рассматриваемого показателя эффективности нестационарности и периода наблюдений. Среднее значение $\Delta_{тр} = 3,3 \%$ и $\Delta_{ст} = 5,5 \%$ для всех рядов и $\Delta_{тр} = 11,5 \%$ и $\Delta_{ст} = 14,3 \%$ для шести рядов с эффективными нестационарными моделями при начале наблюдений с 1980 г. В обоих случаях модель ступенчатых изменений эффективнее, чем модель линейного тренда для аппроксимации временных рядов. Хотя для двух случаев (пункты 80425 и 80522) эффективнее или сопоставима по эффективности модель линейного тренда.

Еще один интересный результат состоит в том, что число эффективных нестационарных моделей по показателю $\Delta_{ст} > 10\%$ возрастает при сдвиге начала ряда от начального года наблюдений к 1980 г. Так, при аппроксимации рядов моделью ступенчатых изменений за весь период наблюдений эффективными являются четыре случая, а при начале рядов с 1980 г. эффективные нестационарные модели имеют место уже для шести рядов. Поэтому можно считать, что основные изменения средних значений произошли после 1980 г. Об этом свидетельствует и наиболее повторяющийся год начала нестационарности $T_{ст}$, который в основном находится в диапазоне 1993—95 гг.

На основе анализа коэффициентов r также можно сделать два интересных вывода: за период с начала наблюдений по 1960 г. статистически значимая связь минимальных уровней со временем имеет место только в двух случаях (80514 и 80522), а за последний период с 2000 г. — только в одном случае (80522). Это результат также подтверждает вывод, что практически все изменения средних имели место во второй половине XX века [28]. Кроме того, практически все r , за исключением двух случаев, > 0 , что свидетельствует о росте H_{\min} .

Временные графики всех восьми рядов H_{\min} , для которых выявлена нестационарность средних значений и их аппроксимация наиболее подходящими моделями, приведены на рис. 2.

Как следует из графиков рис. 2, в основном наблюдается резкий ступенчатый переход от одних стационарных условий к другим в середине 1990-х, что вполне может быть обусловлено влиянием современного изменения климата, т. к. имеет место одинаковое проявление изменений в разных створах. Интересно отметить, что если разделить все ряды наблюдений на две части: до 1994 г. и после него (первый год наблюдений — 1993 г., 1994 г. — последний год наблюдений), то для шести рядов (70436 р. Печора — с. Ермицы, 70499 р. Колва — с. Хорей-Вер, 70509 р. Ижма — с. Усть-Ухта, 70514 р. Ижма — с. Ижма, 70522 р. Ухта — г. Ухта, 70827 р. Печора — с. Оксина), гипотеза о статистическом равенстве средних значений по критерию Стьюдента отклоняется при уровне значимости $\alpha < 1\%$, т. е. с вероятностью более 99 %.

Вместе с тем, есть и индивидуальные особенности изменений. Так, на р. Печоре — д. Усть-Ковжа (70425) до 1994 г. имел место не стационарный режим, а монотонное падение уровней. Также особенные изменения средних значений уровней в виде трендов разной направленности имеют место на р. Ухте — г. Ухта (70522), где в первую часть ряда до конца 1960-х имело место монотонное падение уровней, а с 1980-х — устойчивый и продолжающийся их рост. Возможно, это связано с относительно небольшой площадью водосбора реки и усиливающимся антропогенным воздействием города Ухта. В створе р. Сулы — д. Коткино (70540) с 2010 г. имеет место резкое падение минимальных уровней, однако, продолжительность этого падения пока короткая, чтобы делать вывод о его статистической значимости.

Выполненные аналогичные исследования для трех видов высших уровней воды (H_{\max} , $H_{\text{лдж}}$, $H_{\text{затор}}$) показали, что эффективные нестационарные модели для аппроксимации этих временных рядов практически отсутствуют. Так, в рядах высших в году уровней воды H_{\max} при разных задаваемых годах начала ряда не было ни одного случая статистически значимых r или $\Delta > 10\%$.

Итоговая информация по оценке установленных климатических изменений в рядах экстремальных уровней воды и максимальных толщин льда приведена в табл. 3, где $K\sigma$ — знак и величина установленных изменений в долях от естественной изменчивости (σ), St — результат оценки стационарности средних значений двух частей временного ряда по критерию Стьюдента при годе разбивки ряда $T_{\text{стр}}$ и знак «+», если гипотеза стационарности или статистического равенства двух средних принимается при уровне значимости $\alpha = 5\%$ и знак «-», если отклоняется. Кроме того, рядом со знаком приведены численные значения уровня значимости (в %), соответствующие расчетному значению статистики критерия

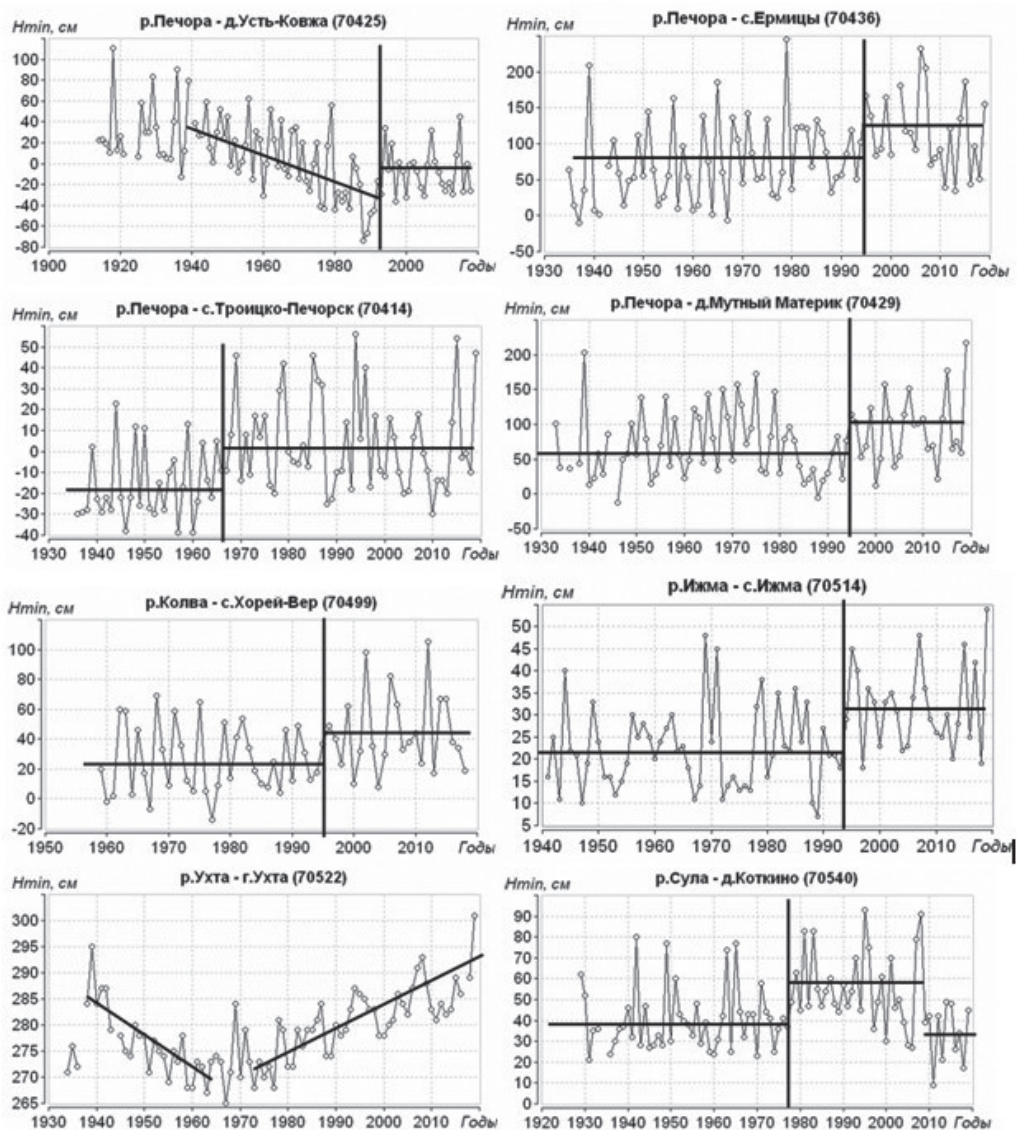


Рис. 2. Нестационарные ряды низших в году уровней воды.

Fig. 2. Non-stationary time series of annual low water levels.

Стьюдента (α_p), если он находился в пределах $1\% < \alpha < 10\%$ [21]. Если же численные значения отсутствуют и знак «+», то гипотеза стационарности принимается при $\alpha > 10\%$, а если знак «-», то гипотеза стационарности отклоняется при $\alpha < 1\%$. Также следует отметить, что статистически значимых изменений в дисперсиях рядов при проверке по критерию Фишера не установлено.

Таблица 3

Результаты оценки эффективности и статистической значимости различий средних значений двух частей временного ряда для экстремальных уровней воды и максимальных толщин льда в створах рек бассейна Печоры

Results of assessment the efficiency and statistical significance of differences in the mean values of the two parts of the time series for extreme water levels and maximum ice thickness in the river gauges of the Pechora basin

Код	H_{\max}		H_{\min}		$H_{\text{лдж}}$		$H_{\text{затоп}}$		h_{\max}	
	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St
70425	+0,25	+	+1,00	-1,8	+0,13	+	+0,70	-2,6	-0,64	-1,1
70427	+0,18	+	-0,33	+	0	+	-0,60	+	+0,57	-
70410	-0,18	+	+0,49	-1,6	0	+	+0,77	+	-0,81	-
70436	-0,24	+	+0,72	-	-0,40	-4,2	-0,33	+	-1,33	-
70414	+0,40	+7,4	+0,90	-	+0,65	-	-0,04	+	-0,68	+6,0
70432	-0,05	+	-0,08	+	-0,48	-2,3			-0,72	-3,8
70570	-0,42	+	+0,63	+8,2	-0,37	+	-0,73	+	+0,46	+
70421	+0,08	+	-0,01	+	-0,30	+	-0,06	+	-0,77	-
70429	+0,11	+	+0,41	+9,1	+0,14	+			-1,27	-
70466	+0,24	+	-0,42	+6,1	+0,13	+	-0,63	+	-1,03	-
70494	-0,12	+	-0,07	+	-0,12	+	-0,18	+	-1,31	-
70499	+0,11	+	+0,73	-	+0,07	+			-1,44	-
70509	+0,42	-4,5	+0,69	-	+0,50	-3,5				
70514	-0,13	+	+1,02	-	-0,18	+	+0,18	+	-1,64	-
70522	+0,38	+	+1,43	-	+0,26	+	-0,30	+	-0,69	+5,6
70531	-0,06	+	+0,12	+	-0,15	+	-0,23	+	-1,04	-
70533	+0,03	+	+0,33	+	-0,04	+			-0,58	-1,4
70540	+0,27	+	+0,56	-1,8	-0,11	+	-0,39	+	-0,72	-
70827	+0,32	+	+0,74	-	-0,01	+	-0,02	+	-1,25	-
70850	+0,24	+	+0,28	-2,0	-0,51	-2,6			-0,62	-4,8

По данным табл. 3 можно сделать следующие выводы:

— изменения средних значений высших в году уровней воды (H_{\max}) статистически не значимы (для пункта 70509 $\alpha_p = 4,5$ и близок к 5 %) и достигают в долях от σ максимум 0,40—0,42;

— для высших уровней весеннего ледохода ($H_{\text{лдж}}$) статистически значимые изменения средних имеют место в пяти случаях, причем в трех случаях средний уровень воды упал, а в двух — вырос, хотя α_p в четырех случаях > 1 %, и максимальное изменение средних значений для статистически значимого отличия составляет всего 0,65 σ ;

— высшие заторные уровни ($H_{\text{затоп}}$) имеют место не во всех пунктах и не в каждый год, поэтому из полученных 14 рядов, которые содержали не менее 15 случаев $H_{\text{затоп}}$ за многолетний период, установлен только один статистически значимый случай роста при $\alpha_p = 2,6$ % и при 0,70 σ ;

— для низших в году уровней воды, как более инерционной характеристики, нестационарные статистически значимые средние значения имеют место в половине случаев, что ранее следовало из данных табл. 2, причем во всех этих случаях

средние H_{\min} выросли, а наибольшие отличия в долях от естественной изменчивости достигают $0,9—1,07\sigma$;

— многолетние ряды максимальных толщин льда (h_{\max}) являются наиболее нестационарными и для них гипотеза о стационарности средних значений двух частей временного ряда отклоняется в 89 % случаев, причем толщины льда практически во всех случаях уменьшились (за исключением одного случая, когда толщина льда увеличилась, видимо, из-за локальных особенностей) и это уменьшение в половине случаев превышает естественную изменчивость и достигает $1,44—1,64$ от σ .

Отдельно было осуществлено моделирование и анализ изменений средних значений для дат начала ($T_{\text{нач}}$), окончания ($T_{\text{кон}}$) и продолжительности ($T_{\text{пер}}$) ледостава. Наглядные примеры нестационарных временных рядов приведены на рис. 3.

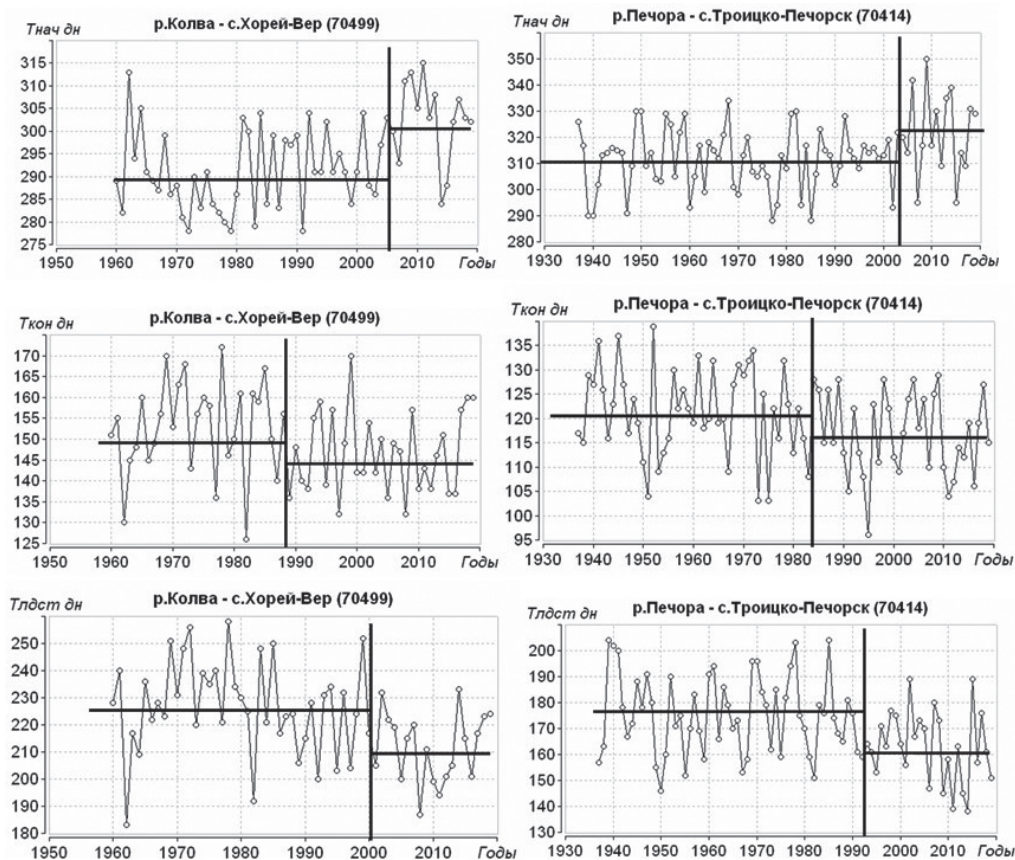


Рис. 3. Нестационарные ряды дат начала ($T_{\text{нач}}$), окончания ($T_{\text{кон}}$) и продолжительности ($T_{\text{пер}}$) ледостава.

Fig. 3. Non-stationary time series of dates of the beginning (T_{beg}), end (T_{end}) and duration (T_{per}) of freeze-up.

Выполненное моделирование временных рядов и оценка устойчивости параметров моделей показало, что эти характеристики существенно более нестационарны по средним значениям, чем высшие уровни воды и максимальные толщины льда. При этом в рядах $T_{\text{нач}}$, $T_{\text{кон}}$ и $T_{\text{пер}}$, как и видно из рис. 3, имеют место взаимосвязанные изменения: даты начала ледостава увеличиваются, т. е. сдвигаются к концу года, даты окончания ледостава уменьшаются, т. е. сдвигаются к началу года, и от этого продолжительность ледостава закономерно уменьшается.

Результаты моделирования при задании разного года начала временного ряда позволили установить, что показатели нестационарности увеличиваются при сдвиге начала ряда от прошлого к настоящему при максимумах для периода с 1980 г. для $T_{\text{нач}}$ и $T_{\text{пер}}$. Модели ступенчатых изменений во всех случаях эффективнее, чем модели линейного тренда и год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{\text{стр}}$) обычно относится к началу 2000-х гг. для $T_{\text{нач}}$ и $T_{\text{пер}}$ и к 1970—1980-м гг. для $T_{\text{кон}}$. Окончательные результаты количественной оценки полученных изменений в датах и продолжительностях ледостава приведены в табл. 4, где ΔT — дни изменения средних значений дат и периодов.

Таблица 4

Результаты оценки эффективности и статистической значимости различий средних значений двух частей временного ряда для дат начала, окончания и продолжительности ледостава в створах рек бассейна Печоры

The results of estimation the effectiveness and statistical significance of the differences in the average values of the two parts of the time series for the dates of the beginning, end and duration of freeze-up in the river gauges of the Pechora basin

Код	$T_{\text{нач}}$		$T_{\text{кон}}$		$T_{\text{пер}}$		ΔT дни		
	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$T_{\text{нач}}$	$T_{\text{кон}}$	$T_{\text{пер}}$
70425	0,44	–	0,31	+	0,52	–3,4	5	3	8
70427	0,44	–4,2	0,19	+	0,46	+	6	2	8
70410	0,81	–	0,37	+5,4	0,90	–	10	3	13
70436	0,59	+5,6	0,47	–3,4	0,71	–1,0	8	5	13
70414	0,76	–	0,44	–1,1	0,89	–	10	4	14
70432	0,62	–4,0	0,48	–4,4	0,73	–4,3	8	5	13
70570	0,83	–	0,34	+	0,95	–	11	3	14
70421	0,57	–1,1	0,59	–	0,82	–	7	6	13
70429	0,66	–	0,37	–2,9	0,73	–2,5	9	4	13
70466	0,67	–2,4	0,17	+7,5	0,56	–2,2	7	2	9
70494	0,63	–	0,42	–4,3			8	5	13
70499	1,11	–	0,46	–2,4	0,93	–	11	5	16
70509		–3,6		+					
70514	0,92	–	0,21	+	0,80	–	11	2	13
70522	0,66	–2,4	0,24	+	0,63	+9,3	8	2	10
70531	0,52	–4,5	0,29	+	0,58	+	6	3	9
70533	0,56	+7,6	0,50	+	0,71	+6,0	7	5	12
70540	0,74	–1,9	0,18	+	0,69	–1,6	9	2	11

Код	$T_{\text{нач}}$		$T_{\text{кон}}$		$T_{\text{пер}}$		ΔT дни		
	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$T_{\text{нач}}$	$T_{\text{кон}}$	$T_{\text{пер}}$
70827	0,50	+5,1	0,11	+	0,41	-4,5	6	1	7
70850	0,63	-	0,29	+	0,65	-3,8	8	3	11

Из результатов табл. 4 следует, что даты начала ледостава наблюдаются позже для всех пунктов, а статистически значимое различие средних двух частей ряда по критерию Стьюдента имеет место в 17 рядах из 20 (85 %), и в долях от естественной изменчивости достигая 1,11 σ . При этом начало ледостава отмечается позже на 5—11 дней (в среднем 8 дней), а дата окончания ледостава раньше всего на 1—6 дней (в среднем 3 дня) для створов в бассейне Печоры. Поэтому модели нестационарного среднего для рядов дат окончания ледостава эффективны только в 6 случаях (30%), причем в двух случаях $\alpha_p = 4,3$ — 4,4 %, т. е. близко к заданному $\alpha = 5$ %.

Низкая эффективность нестационарных моделей для рядов $T_{\text{кон}}$ приводит и к большим ошибкам определения года ступенчатых изменений, который часто относится к 1970-м гг., а не к началу 2000-х, как для $T_{\text{нач}}$ и $T_{\text{пер}}$. Отсюда и небольшие значения изменений средних в долях естественной изменчивости максимально достигающие всего 0,5 σ для $T_{\text{кон}}$.

Число случаев статистически значимых нестационарных рядов по средним значениям для продолжительности ледостава при оценке по критерию Стьюдента при $\alpha = 5$ % составляет 78 %, примерно такое же, как и для дат начала ледостава. При этом $K\sigma$ достигает 0,9—0,95, продолжительность ледостава уменьшилась в среднем на 11 дней при вариации от 7 до 16 дней.

Заключение

Выполненные детальные исследования многолетних рядов экстремальных уровней и показателей ледового режима в бассейне р. Печоры позволяют сделать следующие выводы.

1. Изменение климата, а возможно и антропогенное воздействие, по-разному влияют на разные по инерционности гидрологические характеристики. Так, в высших уровнях весеннего половодья (максимальных в году, весеннего ледохода, заторных высших уровнях) изменения практически не проявляются и многолетние колебания пока еще соответствуют модели стационарной выборки. Для инерционных характеристик, таких как показатели ледового режима рек и низшие уровни воды открытого русла, влияние изменения климата имеет место, и в большинстве случаев оно статистически значимо.

2. Оценка устойчивости показателей нестационарных моделей во времени позволила установить, что изменения средних значений начались только в 1970—1980-х гг., но наибольшее их проявление наблюдалось в конце 1990-х — начале 2000-х гг. в основном в виде ступенчатых переходов от одного стационарного режима к другому.

3. Наибольшие изменения имели место в максимальной толщине льда, которая хорошо связана с таким климатическим фактором, как суммы отрицательных температур, и эти изменения в половине случаев превысили СКО, а уменьшение максимальной толщины льда составило от 7—8 до 22—28 см в разных створах.

4. Даты начала ледостава сместились в сторону более поздних и стали позже в среднем на восемь дней, а даты окончания ледового периода на реках отмечаются раньше в среднем на три дня, что в результате уменьшило продолжительность ледостава на 11 дней. Даже, несмотря на то, что эти изменения составляют 5—8 % от общей продолжительности ледового периода на реках, они являются в большинстве случаев статистически значимыми.

5. Низшие уровни летне-осенней межени, сформированные истощением поверхностных и подземных вод, в основном выросли, и этот рост примерно в половине случаев является статистически значимым, хотя пока еще не превышает стандарт естественной изменчивости.

Список источников

1. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 247 с.
2. Нежиховский Р. А., Бузин В. А. Условия образования и прогнозы заторов льда на реках // Метеорология и гидрология. 1977. № 5. С. 70—75.
3. Бузин В. А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб., 2015. 240 с.
4. Бузин В. А., Горошкова Н. И., Стриженок А. В. Максимальные заторные уровни воды северных рек России в условиях изменения климата и антропогенного воздействия на процесс заторообразования // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 55—61.
5. Терский П. Н., Панченко Е. Д., Горин С. Л., Агафонова С. А., Василенко А. Н., Куликова Ж. М., Попрядухин А. А., Алабян А. М. Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017—2020 гг. // Океанология. 2021. Т. 61, № 6. С. 1006—1008. doi: 10.31857/S0030157421060162.
6. Стриженок А. В. Методика прогноза максимальных заторных уровней воды на реке Печора в условиях изменения климата // Труды V всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». М.: Издательство РГАУ—МСХА, 2016. С. 404—410.
7. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.
8. Методы гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 167 с.
9. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 424 с.
10. Лобанов В. А., Беликов В. Е. Определение расчетных гидрологических характеристик с учетом исторических максимумов // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 89—99.
11. ОД РФ-1 Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М., Росгидромет, 2008. 227 с.; Т. 2. 288 с.
12. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. 1009 с.
13. Борщ С. В., Асарин А. Е., Болгов М. В., Полушин А. Я. Наводнения // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 87—125.
14. Гуревич Е. В. Влияние температуры воздуха на зимний сток рек (на примере бассейна р. Алдан) // Метеорология и гидрология. 2009. № 9. С. 92—99.
15. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата // Труды VI Всесоюзного гидрологического съезда. Секция 3 «Водный баланс, ресурсы поверхностных и подземных вод, гидрологические последствия хозяйственной деятельности и изменений климата: уязвимость и адаптация социально-экономической сферы». М.: Метеоагентство Росгидромета, 2007. С. 159—163.

16. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. М.: Наука, 1982. 271 с.
17. Соколовский Д. Л. Речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 540 с.
18. Лобанов В. А., Тошакова Г. Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России // Географический вестник. 2016. № 3(38). С. 79—89. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-79-89.
19. Лобанов В. А., Шадурский А. Е. Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. СПб.: РГГМУ, 2013. 123 с.
20. Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 64 с.
21. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
22. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 78 с.
23. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
24. Лобанов В. А., Кириллина К. С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография. СПб.: РГГМУ, 2019. 157 с.
25. Лобанов В. А., Горошкова Н. И. Характеристики ледового режима рек Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С. 86—98. doi: 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98.
26. Шукри О. А. А., Лобанов В. А., Хамид М. С. Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография. СПб.: РГГМУ, 2018. 190 с.
27. Лобанов В. А., Наурызбаева Ж. К. Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с.
28. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Когда наступит безледный режим регионов Арктики? // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 98—109. doi: 10.24412/2658-4255-2022-1-08-23.

References

1. Donchenko R. V. *Ledoviy rezhim rek SSSR = Ice regime of the rivers of the USSR*. Gidrometeoizdat, 1987: 247 p. (In Russ.).
2. Nezhovskiy R. A., Buzin V. A. Conditions for the formation and forecasts of ice jams on rivers. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 1977;(5):70—75. (In Russ.).
3. Buzin V. A. *Zazhory i zatory l'da na rekakh Rossii = Ice jams and ice jams on the rivers of Russia*. St.Petersburg, 2015: 240 p. (In Russ.).
4. Buzin V. A., Goroshkova N. I., Strizhenok A. V. Maximum jam water levels in the northern rivers of Russia under conditions of climate change and anthropogenic impact on the process of jam formation. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2014;(12):55—61. (In Russ.).
5. Tersky P. N., Panchenko E. D., Gorin S. L., Agafonova S. A., Vasilenko A. N., Kulikova Zh. M., Popryadukhin A. A., Alabyan A. M. Studies of the winter regime of the mouths of the White Sea in 2017—2020. *Okeanologiya = Oceanology*. 2021; 61(6):1006—1008. (In Russ.).
6. Strizhenok A. V. Methodology for forecasting maximum water jam levels on the Pechora River under climate change. *Trudy V sserossiiskoi konferentsii «Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii» = Proceedings of the V All-Russian Conference "Ice and Thermal Processes in Water Bodies of Russia"*. Moscow: Publishing house of RGAU — MSHA, 2016: 404—410. (In Russ.).
7. *Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitel'stvu = Opredeleniye osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik. SP 33-101-2003. A set of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics*. Moscow: Gosstroy Rossii, 2004: 73 p. (In Russ.).
8. *Metody gidrologicheskikh raschetov pri vodokhozyaystvennom proyektirovanii. Methods of hydrological calculations in water management design*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 167 p. (In Russ.).
9. Rozhdestvenskiy A. V., Chebotarev A. I. *Statisticheskiye metody v gidrologii = Statistical methods in hydrology*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974: 424 p. (In Russ.).
10. Lobanov V. A., Belikov V. Ye. Determination of calculated hydrological characteristics taking into account historical maximums. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2007;(2):89—99. (In Russ.).

11. *OD RF-1 Otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. T. 1. Izmeneniya klimata = OD RF-1 Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. V. 1. Climate change.* Moscow: Roshydromet, 2008: 227 p. V. 2: 288 p. (In Russ.).
12. *Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii = The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation.* Moscow, 2014: 1009 p. (In Russ.).
13. Borshch S. V., Asarin A. Ye., Bolgov M. V., Polunin A. Ya. *Navodneniya. Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem = Floods. Methods for assessing the consequences of climate change for physical and biological systems.* Moscow: Rosgidromet, 2012: 87—125. (In Russ.).
14. Gurevich Ye. V. Influence of air temperature on the winter runoff of rivers (on the example of the Aldan river basin). *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology.* 2009;(9):92—99. (In Russ.).
15. Shiklomanov I. A., Georgiyevskiy V. Yu. Changes in the runoff of Russian rivers under global climate warming. *Trudy VI Vsesoyuznogo gidrologicheskogo s'yezda. Sektsiya 3 «Vodnyy balans, resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, gidrologicheskiye posledstviya khozyaystvennoy deyatel'nosti i izmeneniya klimata: uyazvimost' i adaptatsiya sotsial'no-ekonomicheskoy sfery» = Proceedings of the VI All-Union Hydrological Congress. Section 3 "Water balance, surface and groundwater resources, hydrological consequences of economic activities and climate change: vulnerability and adaptation of the socio-economic sphere".* Moscow: Meteorological Agency of Roshydromet, 2007: 159—163. (In Russ.).
16. Kritsky S. N., Menkel M. F. *Gidrologicheskiye osnovy upravleniya vodokhozyaystvennymi sistemami = Hydrological bases of management of water management systems.* Moscow: Nauka, 1982: 271 p. (In Russ.).
17. Sokolovsky D. L. *Rechnoy stok = River runoff.* Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968: 540 p. (In Russ.).
18. Lobanov V. A., Toshchakova G. G. Features and causes of modern climate change in Russia. *Geograficheskii vestnik = Geographic Bulletin.* 2016;3(38):79—89. (In Russ.).
19. Lobanov V. A., Shadurskiy A. Ye. *Vydeleniye zon klimaticheskogo riska na territorii Rossii pri sovremennom izmenenii klimata. Monografiya = Identification of climatic risk zones on the territory of Russia under current climate change. Monograph.* St. Petersburg: Russian State Humanitarian University, 2013: 123 p. (In Russ.).
20. *Rekomendatsii po privedeniyu ryadov rechnogo stoka i ikh parametrov k mnogoletnemu periodu = Recommendations for bringing river runoff series and their parameters to a multi-year period.* Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979: 64 p. [In Russian].
21. Zaks L. *Statisticheskoe otcenivanie = Statistical Evaluation.* Moscow: Statistica, 1976: 598 p. (In Russ.).
22. *Rekomendatsii po statisticheskim metodam analiza odnorodnosti prostranstvenno-vremennykh kolebaniy rechnogo stoka = Recommendations on statistical methods for analyzing the homogeneity of spatial and temporal fluctuations in river runoff.* Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 78 p. (In Russ.).
23. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii = Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information.* St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
24. Lobanov V. A., Kirilina K. S. *Sovremennyye i budushie izmeneniya klimata Respubliki Sakha (Yakutiya) = Current and future climate changes in the Republic of Sakha (Yakutia).* Monograph. St. Petersburg, RSHU. 2019: 157p. [In Russian].
25. Lobanov V.A., Goroshkova N.I. Characteristics of the ice regime of the rivers Sakha (Yakutia) and their climatic changes. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU.* 2019;(55):86—98. (In Russ.).
26. Shukri O. A. A., Lobanov V. A., Khamid M. S. *Sovremennyye i budushiy klimat Araviyskogo poluostrova = The current and future climate of the Arabian Peninsula.* Monograph. St. Petersburg, RSHU, 2018: 190 p. (In Russ.).
27. Lobanov V. A., Naurozbayeva Zh. K. *Vliyaniye izmeneniya klimata na ledovyy rezhim Severnogo Kaspiya = Influence of climate change on the ice regime of the Northern Caspian.* Saint-Petersburg, Publishing House of the Russian State Humanitarian University, 2021: 140 p. (In Russ.).

28. Malinin V. N., Vainovsky P. A. When will the icefree regime of the Arctic regions come? *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2019;(56):98—109. (In Russ.).

Информация об авторах

Лобанов Владимир Алексеевич — д-р техн. наук, ст. науч. сотр., проф. кафедры МКОА РГГМУ, (8)905-259-56-41, lobanov@EL6309.spb.edu.

Горошкова Наталья Ивановна — канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ГГИ, (8)911-769-47-08, goroshnat@yandex.ru.

Стриженок Анастасия Владимировна — мл. науч. сотр., ГГИ, (8)950-035-88-53, anastasiastrizhonok@mail.ru.

Семенова Дарья Артемиевна — ведущий инженер, ГГИ, (8)931-356-62-90, darya.dsa@yandex.ru.

Information about authors

Vladimir A. Lobanov, D-r of Sci. (Tech.), Senior Scientist, Professor of the Department of Meteorology, Climatology and Air Protection, Russian State Hydrometeorological University (RSHU).

Natalia I. Goroshkova, PhD (Tech. Sci.), Senior Scientist, State Hydrological Institute (SHI).

Anastasia V. Strizhonok, junior researcher, State Hydrological Institute (SHI).

Darja A. Semionova, leading engineer, State Hydrological Institute (SHI).

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 17.04.2022.

Принята к публикации после доработки 26.07.2022.

The article was received on 17.04.2022.

The article was accepted after revision on 26.07.2022.