

Гидрология
Шмакова М.В.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 504.455

doi: 10.17072/2079-7877-2023-3-83-92

УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ ТРЕХ КРУПНЕЙШИХ ОЗЕР ЕВРОПЫ: ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ

Марина Валентиновна Шмакова

Институт озерадения РАН – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Россия
m-shmakova@yandex.ru, Scopus 15064845100, Orcid 0000-0002-2393-0070, WoS ResearcherID J-9490-2018, SPIN-код 9076-9784, РИНЦ AuthorID 66373

Аннотация: Крупнейшие озера Европы, как и все водные объекты региона, находятся под влиянием климатических изменений. Наиболее выраженные изменения водного режима озер приходятся на внутригодовое распределение уровня воды. Увеличение среднегодовой температуры воздуха (в среднем на 1.3 °С) и годовых слоев осадков (в среднем от 35 до 77 мм/год) во втором климатическом периоде практически не отразилось на среднегодовых уровнях воды Ладожского и Чудско-Псковского. Тогда как среднегодовой уровень воды Онежского озера во втором климатическом периоде (1991 – 2020 гг.) увеличился на 10 % в сравнении с первым периодом (1961 – 1990 гг.). При этом приток в Онежское озеро не изменился и составляет около 16.7 км³/год. Для более чем 140 летнего периода имеют выраженные тенденции к уменьшению среднегодового уровня воды Чудско-Псковского озера и Ладоги, и тенденции к увеличению среднегодового уровня воды Онеги. При этом, для уровня значимости $\alpha=0.1$ тренды изменения уровней исследуемых озер являются значительными. Увеличение уровня Онеги объясняется тем, что Онежское озеро находится под влиянием Верхне-Свирской ГЭС и характеризуется подпорным режимом. Влияние подпорного режима определило также неоднородность среднегодовых уровней воды Онежского озера. Помимо этого, относительная близость этого водоема к Белому морю определяет более выраженное влияние арктического воздушного массопереноса на условия формирования стока на водосборе Онеги.

Ключевые слова: озеро, температура воздуха, слой осадков, уровень озера, климат, тенденции, статистический анализ

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме 0154-2019-0003.

Для цитирования: Шмакова М.В. Уровенный режим трех крупнейших озер Европы: Прошлое и настоящее // Географический вестник = Geographical bulletin. 2023. № 3(66). С. 83-92. doi: 10.17072/2079-7877-2023-3-83-92.

HYDROLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2023-3-83-92

THE LEVEL REGIME OF THE THREE LARGEST LAKES IN EUROPE: THE PAST AND THE PRESENT

Marina.V. Shmakova

Institute of Limnology RAS, Saint Petersburg, Russia
m-shmakova@yandex.ru, Scopus 15064845100, Orcid 0000-0002-2393-0070, WoS ResearcherID J-9490-2018, SPIN-код 9076-9784, РИНЦ AuthorID 66373

Abstract. The largest lakes in Europe, as well as all water objects in the region, are under the influence of climate change. The most pronounced changes in the water regime of lakes are noted in the intra-annual distribution of the water level. The increase in the average annual air temperature (by 1.3°C on average) and annual precipitation layers (from 35 to 77 mm/year on average) in the second climatic period practically did not affect the average annual water levels of lakes Ladoga and Peipus, whereas the average annual water level of Lake Onega in the second climatic period (1991 – 2020) increased by 10% compared to the first period (1961 – 1990). At the same time, the inflow to Lake Onega has not changed and is about 16.7 km³/year. For more than 140 years, there have been pronounced trends toward a decrease in the average annual water level of Peipus and Ladoga and toward an increase in the average annual water level of Onega. For the significance level $\alpha=0.1$, the trends of changes in the levels of the studied lakes are significant. The increase in the level of Onega is explained by the fact that this lake is under the influence of the Verkhne-Svirskaya HPP and is characterized by a retaining regime. The influence of the retaining regime also determined the heterogeneity of the

Гидрология
Шмакова М.В.

average annual water levels of Lake Onega. In addition, the relative proximity of this reservoir to the White Sea results in a more pronounced influence of the Arctic air mass transfer on the conditions for the formation of runoff in the Onega catchment.

Keywords: lake, air temperature, precipitation layers, lake level, climate, trends, statistical analysis

Funding. The study was conducted as part of the state assignment for the Institute of Limnology RAS – St. Petersburg Federal Research Center RAS under topic FFZF-2024-00010154-2019-0001.

For citation: Shmakova M. V. (2023). The level regime of the three largest lakes in Europe: the past and the present. *Geographical Bulletin*. No. 3(66). Pp. 83-92. doi: 10.17072/2079-7877-2023-3-83-92.

Введение

Климат северо-запада РФ характеризуется частой сменой воздушных масс, формирующихся преимущественно над Атлантикой и Арктикой. Разнообразные физико-географические условия региона совместно с влиянием таких значительных водных объектов как Белое и Баренцево море, Финский залив, Ладожское, Чудско-Псковское и Онежское озера определяют неоднородность климатических характеристик и тенденций их изменений на рассматриваемой территории [16, 17, 19, 21]. При этом направленные изменения водного режима водных объектов являются индикатором текущих климатических изменений. Результирующие водного баланса, к основным элементам которого относятся осадки, водообмен с подземными водоносными горизонтами, испарение и сток притоков и вытекающих водотоков, определяют такие показатели водного режима как внутригодовая и многолетняя динамика уровня воды водоемов. При неизменном режиме водопользования, изменение годовых слоев осадков и температуры воздуха, определяющей интенсивность испарения, и внутригодовое перераспределение этих величин являются основной причиной изменения годовой и внутригодовой водности водоемов. Тенденции изменения водного режима в этом случае полностью определяются соотношением и направленностью изменений обозначенных метеорологических величин. При этом для крупных водных объектов, представляющих собой достаточно устойчивые и инерционные природные системы, реакция на выраженные тенденции климатических изменений более умеренная в сравнении с динамикой самих тенденций.

Цель настоящей работы состоит в оценке тенденций климатических изменений северо-западного региона РФ и анализе связанной с этим динамики уровня воды трех крупнейших озер Европы – Ладожского, Онежского и Чудско-Псковского.

Объекты исследования

Ладожское, Онежское, Чудско-Псковское озера, самые большие водоемы северо-запада РФ, принадлежат водосбору Финского залива Балтийского моря. Географически озера имеют последовательное широтно-долготное расположение. Онежское озеро находится на северо-востоке от Ладожского, Чудско-Псковское – на юго-западе. Климат территории, где расположены исследуемые водоемы, колеблется от умеренно-морского до умеренно-континентального. Озера характеризуются устойчивым ледоставом в зимний период, водный режим определяется характерным для исследуемого региона подъемом уровня в период активного снеготаяния и интенсивных осадков. Удельные водосборы Онеги и Чудско-Псковского озер (отношение площади водосбора к площади зеркала) составляют около 5.5, что характеризует питание этих озер преимущественно атмосферными осадками [6]. Величина удельного водосбора Ладоги, равная 14.5 (11.6 без водосбора Онеги), является средней и показывает значимость не только атмосферного, но и водосборного питания водоема [2, 12].

Площадь зеркала Ладожского озера, крупнейшего пресноводного озера Европы, составляет 17.7 тыс. км², наибольшая и средняя глубины, соответственно, 230 и 46.9 м.

Гидрология
Шмакова М.В.

Водосбор Ладожского озера расположен на территории Финляндии и России и включает в себя также водосбор Онежского озера. Основными притоками Ладожского озера являются реки Волхов, Свирь, Вуокса, Сясь, из озера вытекает только один водоток – река Нева. Совместно с Онежским озером, Ладога имеет важное геостратегическое значение для региона не только как крупнейший источник водных ресурсов, но и как ключевое звено водной транспортной магистрали – Волго-Балтийского водного пути [13].

Онежское озеро, второй по величине пресноводный водоем Европы, также, как и Ладога, находится на стыке Балтийского щита и Русской платформы [9]. Большая часть (80%) озера находится на территории Республики Карелии, оставшиеся 20% расположены в Вологодской и Ленинградской областях. Площадь зеркала озера составляет 9.7 тыс. км², наибольшая и средняя глубины, соответственно, 120 и 30 м. В Онегу впадают реки Шуя, Суна, Андома, Водла, Вытегра, а вытекает река Свирь, восточный приток Ладоги. Начиная с середины прошлого века с введением в эксплуатацию Верхне-Свирской ГЭС, Онежское озеро фактически стало водохранилищем с зарегулированным режимом стока [5, 11] и с увеличением среднегодового уровня воды на 32 см [11].

Чудско-Псковское озеро – четвертое по величине пресноводное озеро Европы. Площадь зеркала этого озера составляет 3.5 тыс. км², наибольшая и средняя глубины – 15 и 7.1 м, соответственно. Чудско-Псковское озеро – это трансграничный водный объект, его водосборная площадь расположена на территории Эстонии и России, сама акватория также находится в ведении двух государств. При этом Чудско-Псковское озеро представляет собой озерный комплекс, состоящий из трех последовательных частей – Чудское озеро (73 %), Теплое озеро (7 %) и Псковское озеро (20 %) [4, 10]. В озеро в общей сложности впадает около 30 рек, наиболее крупные из которых реки Великая и Эмайыги, а вытекает один водоток – трансграничная река Нарва.

Анализ рядов наблюдений

В настоящее время выделяются 30-летние климатические периоды, называемые Климатологическими базовыми нормами ВМО [1, 8]. Исторический базовый климатический период представлен 1961 – 1990 годами. Этот период служит основой для долгосрочной оценки изменения климата. Текущий базовый климатический период представлен 1991 – 2020 годами [1, 8]. На рис. 1 и 2 приведены хронологический ход и внутригодовое распределение среднегодовой температуры воздуха, годовых слоев осадков и среднегодового уровня воды для двух климатических периодов 1961-1990 и 1991-2020 гг. по метеостанциям г. Псков, г. Сортавала и г. Петрозаводск и водомерным постам оз. Ладожское – о. Валаам, оз. Онежское – пгт. Вознесенье, оз. Чудско-Псковское – д. Залита. А в табл. 1 представлены абсолютные и относительные отклонения между указанными величинами для этих климатических периодов. Согласно таблице, существенные изменения наблюдаются для среднегодовой температуры воздуха (увеличение более, чем на 1 °С) и годовых слоев осадков (увеличение от 35 до 77 мм/год или на 6 – 12 %). Для среднегодового уровня воды в Ладожском и Чудско-Псковском озерах принципиальных увеличений нет. Для Онежского озера уровень повысился более, чем на 10 %. При этом, согласно рис. 2 имеет место равномерное увеличение уровня Онежского озера в течение года. Также по данным всех метеостанций наблюдается существенный рост температуры воздуха в зимние месяцы с декабря по февраль в среднем на 2.6 °С (1.8 – 3.2 °С).

Гидрология
Шмакова М.В.

Таблица 1

Абсолютные и относительные отклонения среднегодовых значений исследуемых величин для двух климатических периодов

Absolute and relative deviations of the average annual values of the studied parameters for two climatic periods

	1961-1990	1991-2020	Абсолютное отклонение	Относительное отклонение, %
Ладожское оз.				
$t, ^\circ\text{C}$	3.03	4.34	1.31	43.3
$P, \text{ мм/год}$	600	677	77.5	12.9
$H, \text{ мм}$	463	464	1.00	0.18
Онежское оз.				
$t, ^\circ\text{C}$	2.45	3.66	1.21	49.4
$P, \text{ мм/год}$	571	606	35.5	6.21
$H, \text{ см}$	127	140	13.0	10.2
Чудско-Псковское оз.				
$t, ^\circ\text{C}$	5.03	6.28	1.30	26.0
$P, \text{ мм/год}$	611	684	73.0	12.0
$H, \text{ мм}$	190	193	2.95	1.55

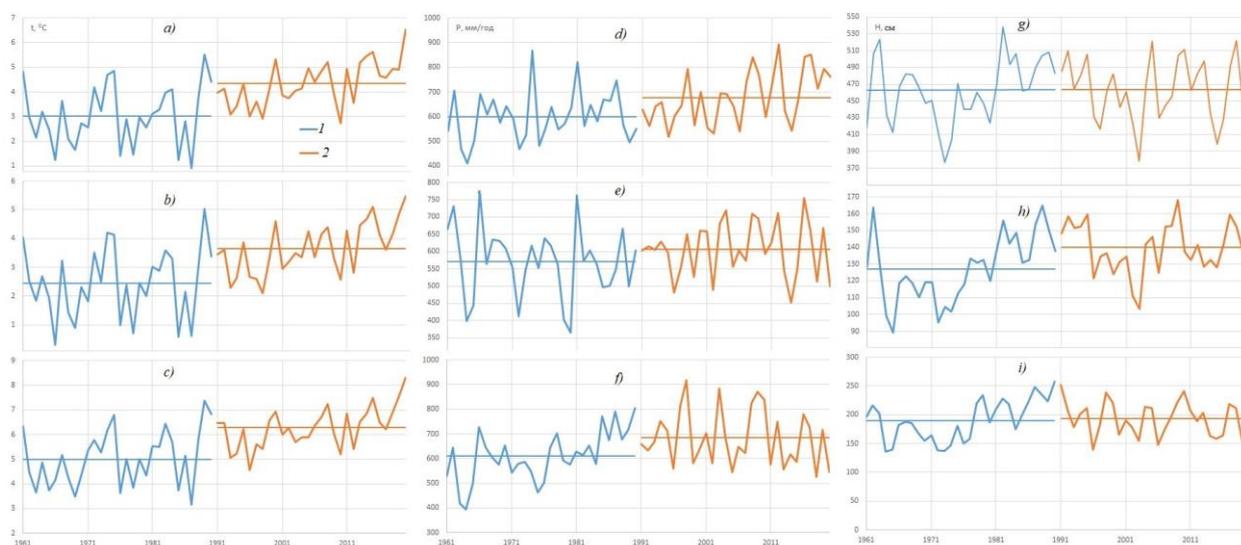


Рис. 1. Хронологический ход для двух климатических периодов (1 – 1961–1990; 2 – 1991–2020) среднегодовой температуры воздуха (a – м/ст г. Сортавала; b – м/ст г. Петрозаводск; c – м/ст г. Псков), годовых слоев осадков (d – м/ст г. Сортавала; e – м/ст г. Петрозаводск; f – м/ст г. Псков), среднегодового уровня озера (g – оз. Ладожское; h – оз. Онежское; i – Чудско-Псковское оз.)

Fig. 1. Chronological course for two climatic periods (1 – 1961–1990; 2 – 1991–2020) of the average annual air temperature (a – weather station in Sortavala; b – weather station in Petrozavodsk; c – weather station in Pskov), annual precipitation layers (d – weather station in Sortavala; e – weather station in Petrozavodsk; f – weather station in Pskov), and the average annual level of the lake (g – Lake Ladoga; h – Lake Onega; i – Lake Peipus)

Гидрология
Шмакова М.В.

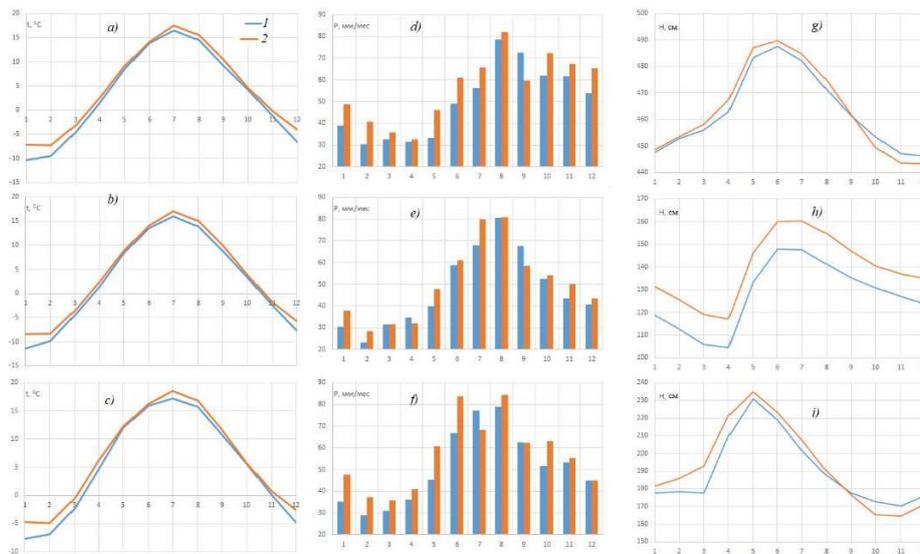


Рис. 2. Внутригодовой ход для двух климатических периодов (1 – 1961–1990; 2 – 1991–2020) среднегодовой температуры воздуха (*a* – м/ст г. Сортавала; *b* – м/ст г. Петрозаводск; *c* – м/ст г. Псков), годовых слоев осадков (*d* – м/ст г. Сортавала; *e* – м/ст г. Петрозаводск; *f* – м/ст г. Псков), среднегодового уровня озера (*g* – оз. Ладожское; *h* – оз. Онежское; *i* – Чудско-Псковское оз.)

Fig. 2. Intra-annual course for two climatic periods (1 – 1961-1990; 2 – 1991-2020) of the average annual air temperature (*a* – weather station in Sortavala; *b* – weather station in Petrozavodsk; *c* – weather station in Pskov), annual precipitation layers (*d* – weather station in Sortavala; *e* – weather station in Petrozavodsk; *f* – weather station in Pskov), and the average annual level of the lake (*g* – Ladoga; *h* – Onega; *i* –Peipus)

На рис. 3 приведены квартильные диаграммы внутригодового распределения среднемесячных значений уровня воды исследуемых озер для двух климатических периодов, совмещенные с линией трехсредних значений этой величины. В данном построении (рис. 3) рассматривается 1.5 интерквартильный размах *IQR*, за пределами которого данные наблюдений рассматривают как возможные выбросы [7, 18, 20]. Согласно полученным результатам заметных изменений в интерквартильном размахе среднемесячных уровней исследуемых озер не наблюдается.

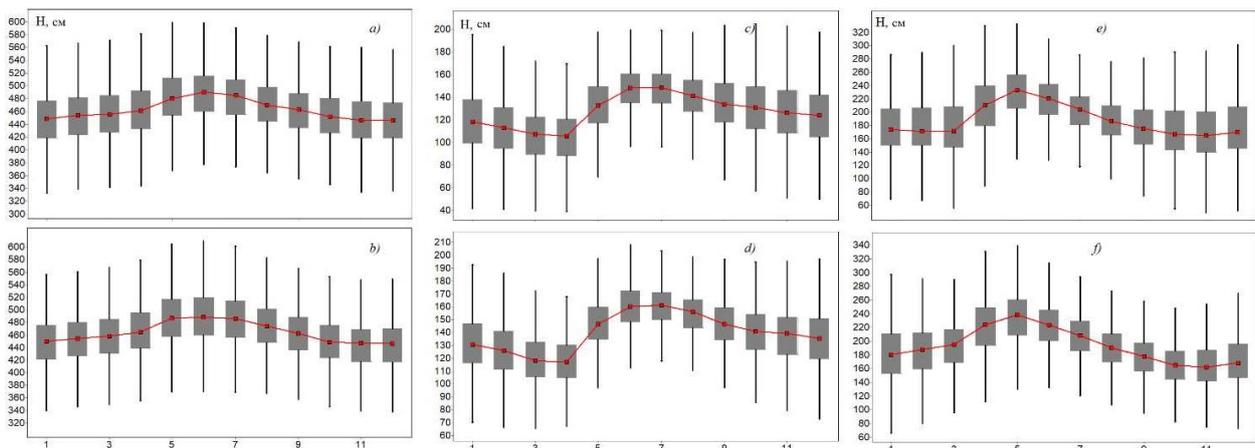


Рис. 3. Квартильные диаграммы среднемесячных значений уровня воды Ладожского (*a* – 1961-1990; *b* – 1991-2020), Онежского (*c* – 1961-1990; *d* – 1991-2020), Чудско-Псковского (*e* – 1961-1990; *f* – 1991-2020) озер с обозначенной линией трехсредних значений

3. Quartile diagrams of average monthly water level values of Ladoga (*a* – 1961-1990; *b* – 1991-2020), Onega (*c* – 1961-1990; *d* – 1991-2020), and Peipus (*e* – 1961-1990; *f* – 1991-2020) lakes with a designated line of three-average values

Гидрология
Шмакова М.В.

Ряды среднегодовых уровней воды исследуемых озер подчиняются нормальному закону распределения (согласно критерию Колмогорова-Смирнова), поэтому в дальнейших оценках используются методы параметрической статистики. В табл. 2 представлены статистические параметры исследуемых метеорологических и уровенных рядов. Проверка этих рядов для двух климатических периодов на однородность [13, 14] показала, что по дисперсии (критерий Фишера) все ряды однородны для уровня значимости $\alpha=0.10$, по средним значениям (критерий Стьюдента) ряды однородны лишь для среднегодовых уровней воды Ладожского и Чудско-Псковского озер для того же уровня значимости (табл. 3).

Таблица 2

Статистические параметры исследуемых рядов
Statistical parameters of the studied series

	$P_{1961-1990}$ мм/год	$P_{1991-2020}$ мм/год	$t_{1961-1990}$ $^{\circ}C$	$t_{1991-2020}$ $^{\circ}C$	$H_{1961-1990}$ см	$H_{1991-2020}$ см
Ладожское оз.						
X_{cp}	600	677	3.03	4.34	463	464
σ	103	107	1.21	0.89	38.1	37.3
C_v	0.17	0.16	0.40	0.20	0.08	0.08
C_s	18.5	8.76	2.70	5.39	-4.98	-7.42
Онежское оз.						
X_{cp}	571	606	2.45	3.66	127	140
σ	102	78.8	1.20	0.87	19.7	15.0
C_v	0.18	0.13	0.49	0.24	0.15	0.11
C_s	-3.06	-3.13	0.02	3.25	2.60	-8.67
Чудско-Псковское оз.						
X_{cp}	611	684	5.0	6.3	190	193
σ	101	112	1.12	0.82	35.6	29.2
C_v	0.17	0.16	0.22	0.13	0.19	0.15
C_s	-2.86	13.5	8.32	3.13	0.86	1.02

На рис. 4 приведен хронологический ход исследуемых величин (среднегодовая температура воздуха и годовые слои осадков – м/ст г. Санкт-Петербург, среднегодовые уровни Ладожского озера – о. Валаам, Онежского озера – пгт Вознесенье и Чудско-Псковского озера – д. Залита) и построены линии трендов для периода 1881–2020 гг. (для Чудско-Псковского озера для 1885–2020 гг.). Для иллюстрации многолетнего тренда по метеорологическим величинам принята м/ст г. Санкт-Петербург, поскольку она расположена между исследуемыми водными объектами и, в отличие от метеостанций, рассматриваемых выше, имеет наиболее продолжительный ряд наблюдений. Согласно визуальной оценке имеют место выраженный тренд на повышение для среднегодовой температуры воздуха и среднегодового уровня Онежского озера, а также тренд на понижение среднегодового уровня воды Ладожского и Чудско-Псковского озер. За 141 год согласно линейному тренду уровень Ладожского и Чудско-Псковского озер понизился на 54 и 16 см соответственно, а скорость изменения уровня воды составила в среднем 0.4 и 0.1 см/год. Уровень Онежского озера повысился на 53 см со средней скоростью 0.4 см/год.

На рис. 5 представлены интегральные кривые исследуемых величин для оценки дат нарушения однородности. Согласно этим кривым имеет место отсутствие резких скачков и изменений на графике (интегральная кривая практически укладывается в прямую линию), что говорит об отсутствии отдельных дат нарушения однородности. Исключение составляет ряд среднегодовой температуры воздуха, для которого в начале 70 годов наблюдается рост динамики увеличения значений этой величины. При этом, для уровня значимости $\alpha=0.1$

Гидрология
Шмакова М.В.

согласно критерию Стьюдента, незначительными являются тренды годовых слоев осадков по м/ст г. Санкт-Петербург (табл. 3). Следует заметить, что представленные в табл. 3 оценки на однородность двух выборок метеорологических элементов для двух климатических периодов проведены для метеостанций г. Петрозаводск, г. Сортавала и г. Псков, тогда как оценка значимости тренда среднегодовой температуры воздуха и годовых слоев осадков проведена для м/ст г. Санкт-Петербург.

Таблица 3

Проверка статистических гипотез*
Testing of statistical hypotheses*

Величина	$H_0 (I)$	$H_0 (II)$	$H_0 (III)$
Ладожское оз.			
$t, ^\circ\text{C}$	$t > t_{\alpha=0.1}$	$F < F_{\alpha=0.1}$	$t > t_{\alpha=0.1}$
$P, \text{мм/год}$	$t > t_{\alpha=0.1}$	$F < F_{\alpha=0.1}$	$t < t_{\alpha=0.1}$
$H, \text{см}$	$t < t_{\alpha=0.1}$	$F < F_{\alpha=0.1}$	$t > t_{\alpha=0.1}$
Онежское оз.			
$t, ^\circ\text{C}$	$t > t_{\alpha=0.1}$	$F < F_{\alpha=0.1}$	–
$P, \text{мм/год}$	$t > t_{\alpha=0.1}$	$F < F_{\alpha=0.1}$	–
$H, \text{см}$	$t > t_{\alpha=0.1}$	$F < F_{\alpha=0.1}$	$t > t_{\alpha=0.1}$
Чудско-Псковское оз.			
$t, ^\circ\text{C}$	$t > t_{\alpha=0.1}$	$F < F_{\alpha=0.1}$	–
$P, \text{мм/год}$	$t > t_{\alpha=0.1}$	$F < F_{\alpha=0.1}$	–
$H, \text{см}$	$t < t_{\alpha=0.1}$	$F < F_{\alpha=0.1}$	$t > t_{\alpha=0.1}$

* $H_0 (I)$ и $H_0 (II)$ – гипотезы о равенстве выборочных средних и дисперсии (критерии Стьюдента и Фишера); $H_0 (III)$ – гипотеза о значимости тренда (критерий Стьюдента); α – уровень значимости; t и F – статистики Стьюдента и Фишера; $t_{\text{кр}}$ и $F_{\text{кр}}$ – критические значения статистик Стьюдента и Фишера

* $H_0 (I)$ and $H_0 (II)$ are hypotheses of equality of sample mean and variance (Student's and Fisher's criteria); $H_0 (III)$ is hypothesis of trend significance (Student's criterion); α – significance level; t and F – Student's and Fisher's statistics; $t_{\text{кр}}$ and $F_{\text{кр}}$ – critical values of Student's and Fisher's statistics.

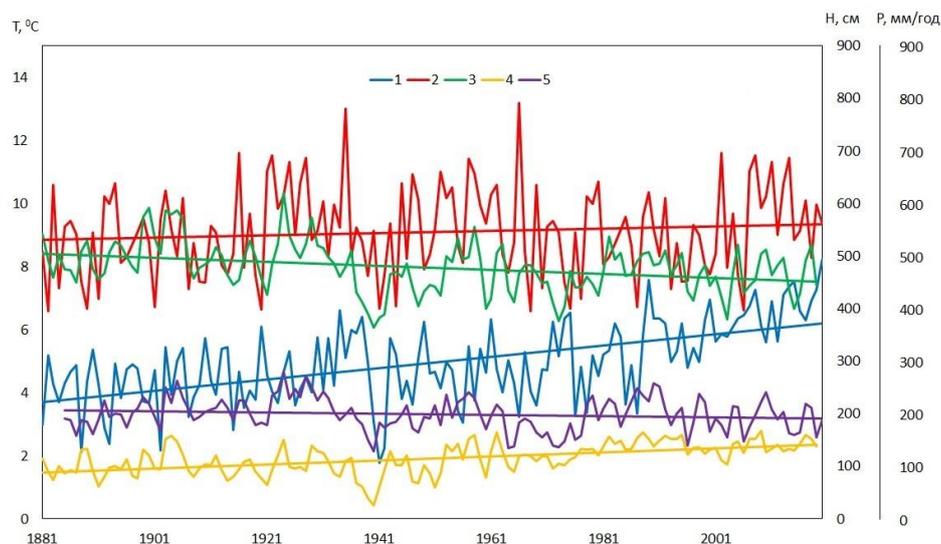


Рис. 4. Хронологический ход среднегодовой температуры воздуха (1), $^\circ\text{C}$, годовых слоев осадков (2), мм/год (м/ст г. Санкт-Петербург), среднегодовых уровней воды, см, Ладожское оз. – о. Валаам (3), Онежское оз. – пгт Вознесенье (4), Чудско-Псковское оз. – д. Залита (5)

Fig. 4. Chronological course of the average annual air temperature (1), $^\circ\text{C}$, annual precipitation layers (2), mm/year (m/st St. Petersburg), average annual water levels, cm; Lake Ladoga – Valaam Island (3), Lake Onega – Voznesenye settlement (4), Lake Peipus – Zhalita village (5)

Гидрология
Шмакова М.В.

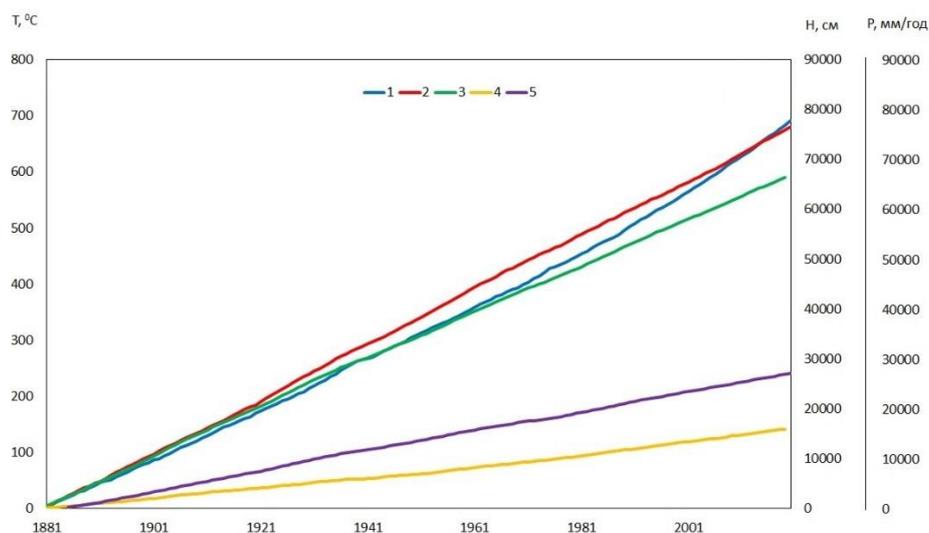


Рис. 5. Интегральные кривые среднегодовой температуры воздуха (1), °С, годовых слоев осадков, мм/год (2) (м/ст г. Санкт-Петербург) и среднегодовых уровней воды, см, Ладожское оз. – о. Валаам (3), Онежское оз. – пгт Вознесенье (4), Чудско-Псковское оз. – д. Залита (5)
Fig. 5. Integral curves of the average annual air temperature (1), °С, annual precipitation layers, mm/year (2) (m/st St. Petersburg), and average annual water levels, cm, Ladoga Lake – Valaam Island (3), Onega Lake – Voznesenye settlement (4), Peipus Lake – Zalita village (5)

Результаты

Существенное повышение температуры воздуха для всего северо-западного региона, которое пришлось преимущественно на зимний период, определило и изменение внутригодового распределения притока воды в исследуемые озера и, как следствие, изменение водного баланса последних. Для Онежского озера имеет место существенное увеличение среднегодового уровня воды более, чем на 10 %, для Ладоги и Чудско-Псковского озера увеличение крайне незначительно и составляет, соответственно, 0.18 и 1.55 %. Также для Онеги имеет место равномерное увеличение уровня воды внутри года, тогда как для Ладоги и Чудско-Псковского озера уровень воды повышается лишь в первой половине года, а три последних месяца, с октября по декабрь, уровень уменьшается. Проверка рядов уровня воды для двух климатических периодов на однородность показала, что по дисперсии все ряды однородны для уровня значимости $\alpha=0.10$, по средним значениям ряды однородны лишь для среднегодовых уровней воды Ладожского и Чудско-Псковского озер для того же уровня значимости. Неоднородность среднегодовых уровней воды Онежского озера объясняется регулированием его режима Верхне-Свирской ГЭС, которая осуществляет многолетнее регулирование стока. Верхнесвирское водохранилище, включившее в свой состав Онежское озеро, наполняется в многоводные годы и срабатывается в маловодные [11].

Линейные тренды уровня воды за продолжительный 141-летний период показали понижение уровня Ладожского и Чудско-Псковского озер на 54 и 16 см, соответственно, и повышение уровня Онеги на 53 см. При этом скорость изменения уровня воды составила в среднем 0.4 для Ладоги и Онеги и 0.1 см/год для Чудско-Псковского озера. Ввиду того, что средний сток притока в Онежское озеро в течение двух рассматриваемых климатических периодов остался неизменным (около 16.5–16.8 км³/год) [3], обратные тенденции изменения уровня Онеги связаны с его подпорным режимом.

Интегральные кривые метеорологических величин и уровня воды исследуемых озер показывают лишь незначительный излом среднегодовой температуры воздуха в 1988 году, который характеризует увеличение динамики роста этой величины. Незначительная

Гидрология
Шмакова М.В.

динамика в повышении среднегодового уровня воды имеет место для Онежского озера начиная с 1950-х годов прошлого века, с ввода в эксплуатацию Верхне-Свирской ГЭС. Для прочих величин изменение скорости приращения не наблюдается.

Выводы

Крупные водные объекты представляют собой достаточно устойчивые природные системы. При этом, современные климатические изменения могут быть скомпенсированы определенными соотношениями метеорологических величин. Так, увеличение температуры воздуха в летний период приводит к увеличению испарения, что в той или иной степени компенсирует рост атмосферных осадков. Основное влияние климатические изменения оказали на внутригодовое распределение уровня воды всех трех исследуемых водоемов. Однако, заметное увеличение температуры и осадков северо-западного региона не привели к значимым изменениям в среднегодовом уровне воды Ладожского и Чудско-Псковского озер. Уровень Онежского озера повысился в сравнении с прошлым климатическим периодом на 10 %. Последнее может быть объяснено как влиянием Верхне-Свирской ГЭС, так и некоторым различием в климатических условиях формирования составляющих водного баланса. Для Онежского озера значительное влияние имеют воздушные массы, приносимые со стороны Белого моря. Тогда как Чудско-Псковское и Ладожское озера находятся под преимущественным влиянием западного переноса воздушных масс с Атлантического океана, которое особенно значимо в теплый период года. Это также объясняет и разнонаправленные тенденции среднегодовых уровней воды исследуемых озер за более чем 140-летний период.

Список источников

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.
2. Григорьев С.В. О некоторых определениях и показателях в озероведении // Труды Карельского филиала АН СССР. 1959. Вып. 18. С. 29–45.
3. Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.
4. Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). Санкт-Петербург, 2010. 96 с.
5. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Воздействие будущих климатических изменений на сток с водосбора Онежского озера // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2022. № 6. С. 41–49. DOI: 10.17076/lim1581
6. Лозовик П.А., Фрумин Г.Т. Современное состояние и допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро // Труды Карельского научного центра РАН, № 3. 2018. С. 3–10. DOI: 10.17076/lim626
7. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. В 2 томах: Том 2. Анализ временных рядов и случайных полей. СПб.: РГТМУ, 2020. 196 с.
8. Новый двухуровневый подход к «климатическим нормам» // Гидрометцентр России. [Электронный ресурс]. URL: <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/11151-03062015-1-r>. (дата обращения: 03.02.2020).
9. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
10. Псковско-Чудское озеро. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. 495 с.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 700 с.
12. Россолимо Л.Л. Основы типизации и лимнологического районирования / В кн.: Накопление веществ в озерах. М.: Наука, 1964. С. 5–46.
13. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. Москва: РАН. 2021. 640 с.
14. Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов. ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017. М.: Стандартинформ, 2017. 53 с.
15. Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. ГОСТ Р 50779.22 2005. М.: Стандартинформ, 2005. 11 с.
16. Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Георгиев А.П., Семенов А.В., Анциферова А.Р., Ожигина В.Н., Богдан М.И. Изменения и изменчивость климата европейского севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 080–093.
17. Chahine M. T. The hydrological cycle and its influence on climate // Nature. 1992. 359. P. 373–380.

Гидрология
Шмакова М.В.

18. McGill R., Tukey J. W., Larsen W.A. Variations of Box Plots. The American Statistician. 1978. Vol. 32. No. 1. P. 12–16.
19. Pierrehumbert R. T. The hydrologic cycle in deep time climate problems // Nature. 2002. 419. P. 191–198.
20. Tukey J.W. Exploratory Data Analysis. Reading MA: Addison-Wesley Publishing Co, 1977. 711 p.
21. Williams P.D., Guilyardi E., Sutton R., Gregory J., Madec G. A new feedback on climate change from the hydrological cycle // Geophysical research letters. 2007. Vol. 34. L08706. Doi:10.1029/2007GL029275

References

1. Report on climate risks in the territory of the Russian Federation. St. Petersburg, 2017. 106 p.
2. Grigor'ev, S.V. (1959), O nekotorykh opredeleniyah i pokazatelyah v ozerovedenii, *Trudy Karel'skogo filiala AN SSSR*, no. 18, pp. 29–45.
3. Diagnosis and prognosis of thermohydrodynamics and ecosystems of the Great lakes of Russia. Petrozavodsk: KarSC RAS, 2020. 255 p.
4. Kondrat'ev, S.A., Golosov, S.D., Zverev I.S., Ryabchenko V.A., Dvornikov A.YU. (2010), *Modelirovanie abioticheskikh processov v sisteme vodosbor-vodoem (na primere CHudsko-Pskovskogo ozera)* [Modeling of abiotic processes in the catchment-reservoir system (on the example of Lake Peipus)], Sankt-Peterburg, 96 p.
5. Kondrat'ev, S.A., SHmakova, M.V. (2022), Vozdejstvie budushchih klimaticheskikh izmenenij na stok s vodosbora Onezhskogo ozera, *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, no. 6, pp. 41–49. DOI: 10.17076/lim1581
6. Lozovik, P.A., Frumin, G.T. (2018), Sovremennoe sostoyanie i dopustimye biogennye nagruzki na Pskovsko-CHudskoe ozero, *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*, no. 3, pp. 3–10. DOI: 10.17076/lim626
7. Malinin, V.N. (2020), *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii: uchebnyk. V 2 tomah: Tom 2. Analiz vremennykh ryadov i sluchajnykh polej* [Statistical methods of analysis of hydrometeorological information: textbook. In 2 volumes: Volume 2. Analysis of time series and random fields], SPb: RSHMU, 196 p.
8. A new two-level approach to "climate norms", Hydrometeorological Center of Russia. [electronic resource]. URL: <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/11151-03062015-1-r>. (Access: 30.03.2023).
9. Onego Lake. Atlas (2010), Editor N.N. Filatov, Petrozavodsk: Kar. SC RAS, 151 p.
10. Peipsi Lake (2012), Tartu: Eesti Loodusfoto, 495 p.
11. Surface water resources of the USSR (1972), vol. 2. Karelia and the North-West. L.: Hydrometeoizdat, 700 p.
12. Rossolimo L.L. *Osnovy tipizacii i limnologicheskogo rajonirovaniya* [Fundamentals of typification and limnological zoning] (1964), In the book *Accumulation of substances in lakes*, M.: Science, pp. 5–46.
13. The current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate (2021), Moscow: RAS, 640 p.
14. Statistical methods. Statistical representation of data. Part 4. Identification and processing of emissions. GOST R ISO 16269-4-2017 (2017), M.: Standartinform, 2017. 53 p.
15. Statistical methods. Statistical representation of data. Point estimation and confidence interval for the mean. GOST R 50779.22 2005 (2005), M.: Standartinform, 2005. 11 p.
16. Filatov, N.N., Nazarova, L.E., Georgiev, A.P., Semenov, A.V., Anciferova, A.R., Ozhigina, V.N., Bogdan, M.I. Climate changes and variability in the European North of Russia and their impact on water bodies (2012), *Arktika: ekologiya i ekonomika*, no. 2 (6), pp. 080–093.
17. Chahine, M. T. (1992), The hydrological cycle and its influence on climate, *Nature*, 359, pp. 373–380.
18. McGill, R., Tukey, J. W., Larsen, W.A. Variations of Box Plots. The American Statistician. 1978. Vol. 32. No. 1. P. 12–16.
19. Pierrehumbert, R. T. (2002), The hydrologic cycle in deep time climate problems, *Nature*, 419, pp. 191–198.
20. Tukey, J.W. (1977), *Exploratory Data Analysis*, Reading MA: Addison-Wesley Publishing Co, 711 p.
21. Williams, P.D., Guilyardi, E., Sutton, R., Gregory, J., Madec, G. (2007), A new feedback on climate change from the hydrological cycle, *Geophysical research letters*, vol. 34, L08706. Doi:10.1029/2007GL029275

Статья поступила в редакцию: 30.03.2023, одобрена после рецензирования: 16.07.2023, принята к опубликованию: 12.09.2023.

The article was submitted: 30 March 2023; approved after review: 16 July 2023; accepted for publication: 12 September 2023.

Информация об авторе

Марина Валентиновна Шмакова

доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математических методов моделирования ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН; 196105 Россия, С.-Петербург, ул. Севастьянова, 9.

Information about the author

Marina V. Shmakova

Doctor of Geographical Sciences
Leading Researcher, Laboratory of Mathematical Modeling Methods, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences;
9, Sevastyanova st., St. Petersburg, 196105, Russia

e-mail: m-shmakova@yandex.ru