

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.555:551.524

СОВРЕМЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ¹

© 2023 г. С. А. Поддубный^а, *, А. В. Законнова^а, А. И. Цветков^а,
Л. Т. Трофименко^б, Н. В. Швець^б

^аИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
пос. Борок, Ярославская обл., 152742 Россия

^бВсероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных, Обнинск, 249035 Россия

*e-mail: spod@ibiw.ru

Поступила в редакцию 09.06.2022 г.

После доработки 24.10.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Рассмотрены изменения температуры воздуха в бассейне волжских водохранилищ, общего притока в водоемы, их водообмена, уровня, температуры воды и теплосодержания водной массы в период открытой воды в разных климатических условиях. Для анализа использованы многолетние ряды гидрометеорологических данных, обработанные статистическими методами. Показано, что в современный период по сравнению с периодом до 1976 г. температура воздуха на побережье водохранилищ увеличилась на 1.3–1.8°C. Скорость потепления составила в среднем 0.50°C/10 лет. Объем годового притока увеличился на 12.4%. На водохранилищах верхнего участка Волги выделено 3 маловодных и 4 многоводных фазы, которые включают 29–31 маловодных, 25–31 многоводных и 8–16 средних по водности лет. В маловодные фазы объем притока в водохранилища на 10–28% ниже среднего многолетнего, а в многоводные – выше на 4–20%. Коэффициент водообмена водохранилищ уменьшался или увеличивался на 5–13% относительно полученных ранее величин. На водохранилищах верхнего участка Волги и на Куйбышевском водохранилище отмечено увеличение зимнего и снижение весеннего притока. В современный период отмечена тенденция повышения среднегодового уровня воды на водохранилищах верхнего участка Волги и на Куйбышевском водохранилище, тогда как на Нижней Волге среднегодовой уровень несколько понизился. В маловодные фазы уровень водохранилищ в среднем был ниже на 17 см, а в многоводные – выше на 10 см среднего многолетнего. Повышение температуры воздуха в течение теплого сезона в пределах акватории водохранилищ в среднем на 1.2°C привело к синхронному повышению температуры водной массы на 1.1°C. При этом теплосодержание водной массы водохранилищ верхнего участка Волги увеличилось в среднем на 24%, а на нижнем участке Волги – всего на 2–11%.

Ключевые слова: водохранилища, температура воздуха, приток, фазы водности, водообмен, уровень воды, температура воды.

DOI: 10.31857/S0321059623030100, EDN: DCFTDU

ВВЕДЕНИЕ

Межгодовая и внутригодовая изменчивость главных характеристик гидрологического режима водохранилищ – составляющих водного баланса, проточности, уровня и температуры воды – определяется режимом притока речных вод в водоемы и регулированием стока воды через гидротехнические сооружения ГЭС. Водный баланс отражает совокупное воздействие факторов, обусловленных колебаниями климата и антропогенной деятельностью на водосборе, является основой для выполнения всех видов исследований, свя-

занных с особенностями формирования и динамики водных масс, гидрохимического и гидробиологического режима водоемов [13, 23].

Вместе с тем продолжающееся интенсивное потепление климата приводит к изменению гидрологических и гидробиологических характеристик водных экосистем и их экологического состояния [26, 33, 34]. В настоящее время изучение влияния климатических изменений на абиотическое звено водных экосистем прослеживается в двух направлениях: анализ многолетних натуральных гидрометеорологических данных на разнотипных водоемах и моделирование будущего гид-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания № 121051100104-6.

рологического режима водоемов при реализации разных климатических сценариев.

Исследованиями последних лет показано, что увеличение транспорта влаги с Атлантики в Европейскую часть России (ЕЧР) в современный период привело к росту годовых сумм осадков со скоростью 0.9% нормы/10 лет. В связи с этим произошло увеличение бокового притока в водохранилища Волжско-Камского каскада в среднем на 28% по отношению к норме за 1946–1977 гг. [1, 3, 15, 18, 19]. Кроме того, увеличение температуры воздуха оказывает непосредственное влияние на термический режим водоемов. Так, оценка реакции термического режима Рыбинского водохранилища на региональные изменения климата показала, что в период потепления (1977–2019 гг.) выявлена тенденция повышения средней за май–октябрь температуры воды со скоростью 0.67°C/10 лет. Такая же закономерность прослеживается и на Волгоградском водохранилище, где с 1960 по 2003 г. температура воды летом (июль–август) повысилась на 1°C [10, 22]. В достаточно глубоких водохранилищах потепление климата может вызывать, помимо увеличения температуры эпилимниона, уменьшение прозрачности воды и глубины залегания термоклина, а также увеличение толщины последнего [35].

Не останавливаясь подробно на описании моделей климата и климатических сценариев, отметим, что при реализации наиболее худшего из них (удвоение содержания CO₂ в атмосфере и увеличение температуры воздуха на 2.6–4.8°C) в середине и второй половине XXI в. могут произойти следующие изменения в гидрологическом режиме внутренних водоемов разных географических зон: сокращение объема годового стока, уменьшение объема воды в водохранилищах, их проточности и амплитуды колебаний уровня. В озерах и водохранилищах повысится температура поверхностного слоя воды (эпилимниона), увеличится продолжительность летней стратификации и произойдет ее усиление [29]. Периоды летней аноксии станут более продолжительными. Изменения в внутриводоемных процессах приведут к более частым и продолжительным вспышкам цветения синезеленых водорослей [6, 7, 24, 28, 32].

Перераспределение внутригодового притока и его общее сокращение могут создать предпосылки к пересмотру правил эксплуатации водохранилищ [4, 27].

Таким образом, актуальность изучения современной проблемы влияния климатических факторов на водные экосистемы позволяет сформулировать цель данной работы, которая заключается в анализе многолетних и сезонных изменений основных показателей гидрологического режима волжских водохранилищ в относительно стаци-

онарный по климатическим условиям период (до 1976 г.) и современный (после 2001 г.), характеризующийся продолжающимся потеплением климата. Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть тенденции изменений температуры воздуха на побережье водохранилищ, общего притока в водоемы, их водообмена, уровня, температуры воды и теплосодержания водной массы в период открытой воды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы многолетние среднемесячные данные температуры воздуха $T_{\text{возд}}$, объема притока W , уровня воды Z , температуры поверхностного слоя воды $T_{\text{воды}}$, температура водной массы $T_{\text{вм}}$ для волжских водохранилищ, заимствованные из архива лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН, баз данных ВНИИГМИ-МЦД, а также с сайта Центра регистра и кадастра [21] (табл. 1). В соответствии с водохозяйственным районированием Ивановское, Угличское, Рыбинское, Горьковское и Чебоксарское водохранилища отнесены к Верхневолжскому бассейновому округу (в дальнейшем – верхний участок Волги), тогда как Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское – к Нижневолжскому бассейновому округу (в дальнейшем – нижний участок Волги). Кроме того, следует отметить, что Ивановское водохранилище относится к Московско-Окскому бассейновому водному управлению.

Среднегодовая температура воздуха, а также средние за холодный (ноябрь–март) и теплый (апрель–октябрь) периоды рассчитывались как средние на метеостанциях (МС), расположенных в разных частях прибрежной зоны водохранилищ (Ивановское – г. Тверь; Угличское – г. Углич; Рыбинское – с. Брейтово, города Рыбинск, Череповец, Пошехонье-Володарск; Горьковское – города Кострома, Кинешма, Городец; Чебоксарское – с. Лысково, города Козьмодемьянск, Чебоксары; Куйбышевское – п. Нижние Вязовые, города Тетюши, Димитровград, Сенгилей; Саратовское – города Самара, Хвалынский; Волгоградское – города Маркс, Камышин). Расчеты выполнены для двух периодов: первый – 1947–1976 гг.; второй – 2001–2019 гг. Начало современного периода потепления климата (2001–2019 гг.) выбрано исходя из следующих положений. Согласно предварительному анализу многолетних рядов температуры воздуха на МС, увеличение $T_{\text{возд}}$ в период с 1977 по 2019 г. по сравнению с периодом до потепления (до 1976 г.) составило 0.8–1.1°C, в период с 2001 по 2019 г. по сравнению с периодом 1977–2019 гг. увеличение $T_{\text{возд}}$ не превышало 0.5–0.7°C. Сравнение же периодов до потепления и современного показало увеличение $T_{\text{возд}}$ на

Таблица 1. Исходные материалы для анализа гидрометеорологических наблюдений на водохранилищах Волги

Водохранилище	Периоды наблюдений, годы		
	$W, *, **$	$T_{\text{возд}}^{***}$	$T_{\text{воды}}^*$
Иваньковское	1951–2020	1947–2019	1951–1992
Угличское	1948–2020	1947–2019	1948–1992
Рыбинское	1947–2020	1947–2020	1947–2019
Горьковское	1957–2020	1947–2019	1957–1992
Чебоксарское	1981–2020	1947–2019	1982–1986
Куйбышевское	1957–2020	1947–2019	1957–1985
Саратовское	1969–2020	1950–2019	1968–1988
Волгоградское	1966–2020	1959–2019	1962–1988

* Архив лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН.
 ** Центра регистра и кадастра [20].
 *** ВНИИГМИ-МЦД.

1.4–1.8°C. Кроме того, согласно данным Всемирной метеорологической организации, современный период отличается увеличением числа экстремально теплых лет (2007, 2010, 2013, 2019 гг.) [4].

Для выявления многолетних особенностей притока в водохранилища использовались разностные интегральные кривые, построенные на основе выражений $\sum_1^i (W_i - W_{\text{ср}})$ или $\sum_1^i (K - 1)/C_v$, где $K = \frac{W_i}{W_{\text{ср}}}$ – модульный коэффициент, W_i и $W_{\text{ср}}$ – соответственно притоки текущий и средний по ряду наблюдений, C_v – коэффициент вариации. Применение последнего выражения, на взгляд авторов статьи, более оптимально, так как позволяет сравнивать интегральные кривые в относительных единицах для любых величин притока в водоемы.

Следующий этап исследований заключается в выделении фаз водности в многолетних колебаниях притока. В гидрологии сформулированы следующие критерии оценки водности года по речному стоку: до 25% вероятности превышения, оцениваемой по многолетнему ряду стока, – многоводные, от 25 до 75% – средние по водности годы, от 75% – маловодные [11]. Для каждой выделенной градации определены диапазоны изменения модульного коэффициента в зависимости от значений коэффициента вариации [12]. Анализ временных рядов притока показал, что для верхнего участка Волги $C_v = 0.26$, а для водохранилищ нижнего участка Волги $C_v = 0.15$. В этом случае для верхнего участка к многоводным относятся годы с $K = 1.7–1.16$, к средним по водности – $1.15–1.83$ и маловодным – $0.83–0.53$. Для нижнего участка Волги соответствующие значения K будут составлять $1.39–1.10$, $1.09–0.9$ и $0.89–0.67$. При использовании указанных выше критериев на до-

лю лет средней водности приходится 50% всех рассматриваемых случаев.

Применительно к водохранилищам такой подход вызывает сомнения, поскольку объем притока в водоемы, помимо климатических факторов, зависит и от режима эксплуатации ГЭС. С другой стороны, Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) предложено к многоводным относить годы с модульными коэффициентами $K > 1.05$, к маловодным – с $K < 0.95$ и к средним по водности – с $1.05 \geq K \geq 0.95$ [16]. Эти более жесткие критерии сужают диапазон средних по водности лет и, соответственно, увеличивают количество многоводных и маловодных лет, что, на взгляд авторов статьи, более адекватно отражает водный режим водохранилищ. Коэффициент водообмена рассчитывался по формуле: $K_w = \frac{W_{\text{ср}}}{V}$, где V – объем водохранилища за расчетный период (год), а его период: $\tau = 1/K_w$ [23].

В связи с отсутствием многолетних рядов температуры водной массы в волжских водохранилищах в безледный период для расчета последней по имеющимся немногочисленным данным находились регрессионные зависимости $T_{\text{вм}} = f(T_{\text{возд}})$ (табл. 1, 2). Причем для каждого водохранилища выбирались МС с ближайшими к ним водомерными постами.

Изменение теплозапаса водохранилищ вычислялось по формуле:

$$\pm \Delta \theta = c_p \rho (W_{\text{кон}} \bar{T}_{\text{кон}} - W_{\text{нач}} \bar{T}_{\text{нач}}),$$

где c_p – теплоемкость воды, $4190 \text{ Дж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$; ρ – плотность воды, $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\bar{T}_{\text{кон}}$, $\bar{T}_{\text{нач}}$ – средняя температура водной массы в конце и в начале расчетного периода, $^\circ\text{C}$; $W_{\text{кон}}$, $W_{\text{нач}}$ – объемы в конце и в начале месяца соответственно, 10^6 м^3 .

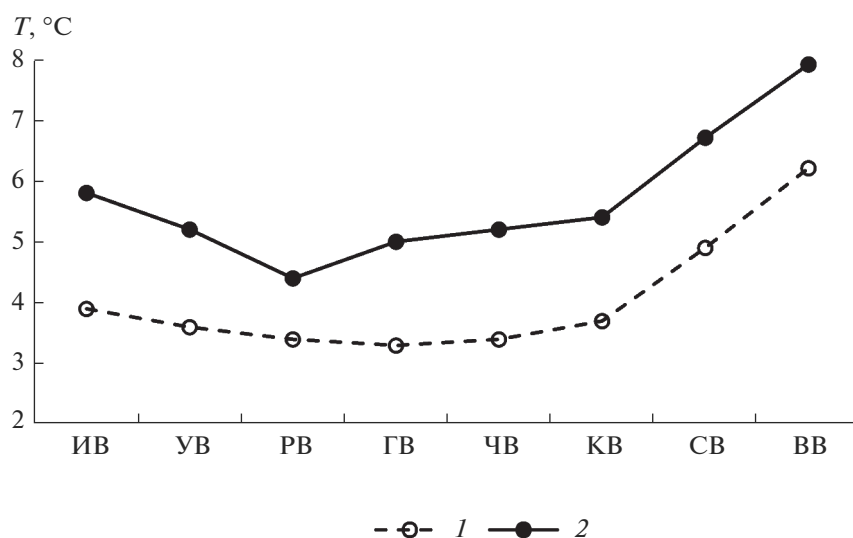


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры воздуха. ИВ, УВ, ГВ, РВ, ГВ, ЧВ, КВ, СВ, ВВ – соответственно Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское водохранилища. 1 – 1947–1976, 2 – 2001–2019 гг.

Коэффициенты множественной детерминации R^2 и уравнения множественной регрессии вычислялись в MS Excel 2010 и STATISTICA 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения температуры воздуха

В климатическом отношении бассейн Волги находится под влиянием Северной Атлантики, определяющей режим тепла и влаги в его регионах [19]. Различия температуры воздуха в бассейне волжских водохранилищ определяются общими закономерностями тепло-массобмена в широтном и меридиональном направлениях.

В современный период среднегодовая температура воздуха на береговых метеостанциях водохранилищ Волги меняется от 4.4°C (Рыбинское водохранилище) до 7.9°C (Волгоградское водо-

хранилище), что на 1.3–1.8°C выше, чем до потепления климата (рис. 1).

Кроме того, важная характеристика климата в годовом цикле – наличие двух сезонов – теплого (апрель–октябрь) с положительной температурой воздуха и холодного (ноябрь–март) с отрицательной температурой. В теплый сезон увеличение температуры воздуха от Иваньковского к Волгоградскому водохранилищу во второй период по сравнению с первым – в пределах 0.8–1.5°C, тогда как в холодный период различия увеличивались практически в 2 раза (табл. 3). За период 2001–2019 гг. средняя температура воздуха в летний сезон (июнь–август) на береговых МС водохранилищ верхнего участка Волги составила 16.5–17.6°C, нижнего участка Волги – 18.1–24.0°C, что на 1.0–2.0°C выше, чем в период до потепления.

Дополнительную информацию об изменениях температуры воздуха в пределах волжских водо-

Таблица 2. Зависимости средней температуры водной массы волжских водохранилищ в безледный период от температуры воздуха (n – число членов ряда)

Водохранилище, пункт наблюдений	$T_{\text{ВМ}} = f(T_{\text{возд}})$	n	R^2
Иваньковское, Тверь	$T_{\text{ВМ}} = -0.091 + 1.157 T_{\text{возд}}$	182	0.95
Угличское, Углич	$T_{\text{ВМ}} = 4.64 + 0.836 T_{\text{возд}}$	114	0.68
Рыбинское, Рыбинск, ГМО	$T_{\text{ВМ}} = 1.437 + 0.957 T_{\text{возд}}$	287	0.82
Горьковское, Юрьевец	$T_{\text{ВМ}} = 0.848 + 1.00037 T_{\text{возд}}$	70	0.84
Куйбышевское, Вязовые	$T_{\text{ВМ}} = 3.26 + 0.863 T_{\text{возд}}$	30	0.73
Саратовское, Самара	$T_{\text{ВМ}} = 5.64 + 0.614 T_{\text{возд}}$	30	0.46
Волгоградское, Камышин	$T_{\text{ВМ}} = 5.71 + 0.634 T_{\text{возд}}$	30	0.52

Таблица 3. Средняя температура воздуха $T_{\text{возд}}$ (°C) в холодный (ноябрь–март) и теплый (апрель–октябрь) периоды года ($\Delta T_{\text{возд}}$ – разница температур между периодами 2001–2019 и 1947–1976 гг.)

Водохранилище	Ноябрь–март			Апрель–октябрь		
	1947–1976 гг.	2001–2019 гг.	$\Delta T_{\text{возд}}$	1947–1976 гг.	2001–2019 гг.	$\Delta T_{\text{возд}}$
Иваньковское	–6.2	–3.9	2.3	11.2	12.7	1.5
Угличское	–7.2	–4.8	2.4	11.3	12.3	1.0
Рыбинское	–7.6	–5.7	1.9	10.8	11.6	0.8
Горьковское	–7.9	–5.5	2.4	11.4	12.5	1.1
Чебоксарское	–8.4	–6.1	2.3	12.1	13.2	1.1
Куйбышевское	–8.7	–6.4	2.3	12.6	13.8	1.2
Саратовское	–8.2	–5.7	2.5	14.3	15.6	1.3
Волгоградское	–6.7	–4.5	2.2	15.4	16.8	1.4
Среднее	–7.6	–5.3	2.3	12.4	13.6	1.2

хранилищ дает анализ годовой динамики отклонений среднемесячной температуры воздуха во второй период относительно первого периода ($T_{1947-1976} - T_{2001-2019} = \Delta T$) на береговых МС водоемов. Как уже отмечалось, наибольший ее прирост отмечен в зимний сезон. Несмотря на некоторые различия динамики, на побережье каждого водохранилища в июне проявляется резкое уменьшение ΔT , т. е. температура воздуха в рассматриваемые периоды практически не различается (17.3–17.5°C) (рис. 2). Выявленное минимальное июньское значение ΔT может быть связано с усилением или ослаблением зонального переноса, показатель многолетних изменений которого – индекс Северо-Атлантического колебания (САК) [18]. Причем в положительной фазе САК происходит усиление зональной атмосферной циркуляции, что подтверждается тесной корреляционной связью между повторяемостью атлантических циклонов и индексом САК. В отрицательной фазе отмечаются ослабление зонального переноса и усиление меридиональных процессов [1, 17, 30, 31]. Так, в многолетнем среднемесячном распределении САК выделяется период с его положительными значениями (январь–май, максимум в марте), свидетельствующий об интенсификации зонального переноса, который далее сменяется преобладающим меридиональным переносом с отрицательными значениями САК и минимумом в июне. Причем преобладание меридионального переноса воздушных масс наблюдается практически весь летне-осенний период (рис. 2).

Как уже отмечалось, период потепления характеризуется увеличением скорости повышения среднегодовой температуры воздуха. За период 1977–2019 гг. средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на МС водохранилищ Волжского каскада составила 0.50°C/10 лет и менялась от 0.45°C/10 лет (г. Кострома, Горьковское

водохранилище) до 0.61°C/10 лет (г. Камышин, Волгоградское водохранилище). В современный период (после 2000 г.) скорость роста температуры воздуха возросла до 0.72°C/10 лет на МС Углич и Рыбинск, тогда как на других МС – тренда увеличения скорости роста температуры не выявлено, что связано, по-видимому, с более коротким рядом наблюдений. В современный период максимальная скорость повышения летней температуры отмечалась на Волгоградском водохранилище – 0.80°C/10 лет (г. Камышин), что соответствовало аналогичным данным Росгидромета [8].

Приток и водообмен

Объем притока воды с водосборов в водохранилища определяется главным образом климатическими условиями, которые в настоящее время характеризуются увеличенным влагосодержанием атмосферы и ростом количества осадков вследствие глобального потепления климата [1, 19]. Сравнение средних годовых величин притока воды в водохранилища в периоды 1978–2013 и 1946–1977 гг. показало, что наиболее значительное увеличение годового притока произошло в бассейнах водохранилищ ЕЧР, в частности – в водоемах Волжско-Камского каскада [15, 20].

Известно, что многолетние колебания притока воды в водохранилища имеют циклический характер и представляют собой чередование разных по продолжительности многоводных и маловодных фаз, которые обусловлены влиянием естественных климатических факторов. Согласно данным ГГИ [16], в многолетнем ряду стока р. Волги выделяются три ветви: подъема (1879–1929 гг.), спада (1930–1977 гг.) и подъема второго цикла (с 1978 г. по настоящее время). Продолжительность ветвей составляет 50 лет.

Создание волжских водохранилищ совпало со второй половиной ветви спада стока, а дальней-

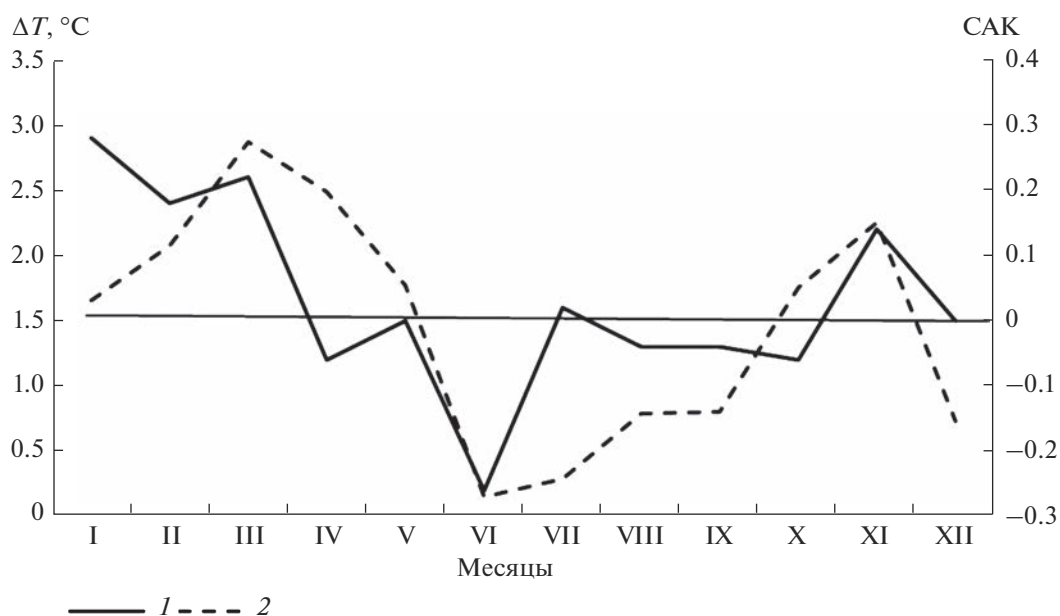


Рис. 2. Динамика изменений среднемесячной температуры воздуха и индекса САК в пределах волжских водохранилищ. 1 – $\Delta T = T_{1947-1976} - T_{2001-2019}$, 2 – индекс САК. Горизонтальная линия – нулевые значения САК.

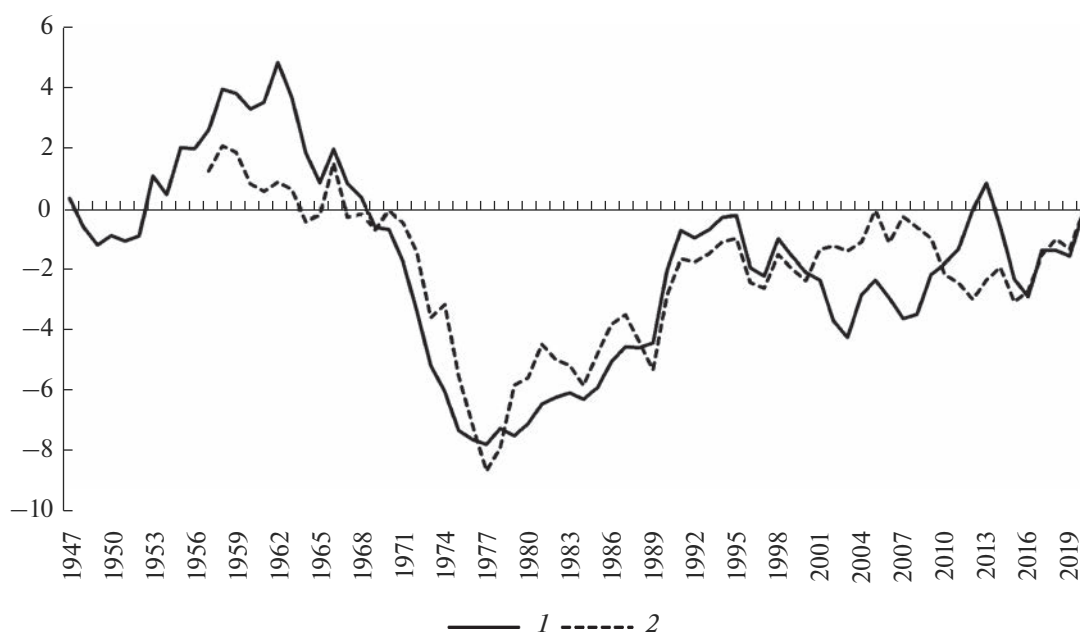


Рис. 3. Разностные интегральные кривые $\Sigma(K-1)/C_v$ общего годового стока волжских водохранилищ. Участки Волги: 1 – верхний, 2 – нижний.

шее их существование приурочено к ветви увеличения стока второго цикла. На каждой ветви выделяются маловодные и многоводные фазы, в пределах которых есть группировки маловодных, средних по водности и многоводных лет продолжительностью от двух до десяти лет, а также отдельные разные по водности годы (рис. 3).

Применительно к водохранилищам верхнего участка Волги авторами выделено 3 маловодных (1963–1976, 1996–2003, 2014–2016 гг.) и 4 многоводных (1951–1962, 1977–1995, 2004–2013, 2017–2020 гг.) фазы, которые включают 29–31 маловодных, 25–31 многоводных и 8–16 средних по водности лет. В силу ограниченности рядов притока в

Таблица 4. Средние характеристики притока и водообмена волжских водохранилищ в разных климатических условиях (обозначения указаны в тексте)

Водохранилище	$W_{\text{ср}}$, км ³		V , км ³		τ , мес	
	до 1976 г.	2001–2020 гг.	до 1976 г.	2001–2020 гг.	до 1976 г.	2001–2020 гг.
Иваньковское	9.09	9.90	0.85	0.96	1.1	1.2
Угличское	10.60	12.26	1.08	1.14	1.2	1.1
Рыбинское	31.34	33.90	17.51	19.54	6.7	7.0
Горьковское	46.06	51.76	8.21	8.26	2.1	1.9
Чебоксарское	–	114.60	–	4.80	–	0.5
Куйбышевское	199.23	253.23	44.29	49.40	2.7	2.4
Саратовское	219.54	255.60	12.93	12.60	0.7	0.6
Волгоградское	219.00	253.30	30.6	30.30	1.7	1.4

водохранилища нижнего участка Волги для них выделено всего по 2 маловодных (1959–1977, 2008–2015 гг.) и многоводных (1978–2007, 2016–2020 гг.) фазы. С продвижением вниз по Волге постепенно увеличивается количество средних по водности лет. Наиболее часто наблюдаемая периодичность смены лет разной водности составляет 2–4 года. Однако выделяются и более длительные периоды разных по водности лет – 10–37 лет.

Объем притока в волжские водохранилища в современный период по сравнению с периодом до потепления (1946–1976 гг.) в среднем увеличился на 12.4%. Наименьшее увеличение (на 7.6%) притока относилось к Рыбинскому водохранилищу, наибольшее (на 22.5%) – к Куйбышевскому. Объем притока постепенно возрастал от Иваньковского до Куйбышевского водохранилища и ниже по каскаду не менялся. В маловодные фазы объем притока в водохранилища верхнего участка Волги был на 12–28% ниже среднего многолетнего, а в многоводные – выше на 12–20%. Приток в водохранилища нижнего участка Волги в маловодные фазы был меньше среднего многолетнего на 10%, а в многоводные фазы – выше на 4–5%.

Коэффициент водообмена водохранилищ в зависимости от соотношения объемов притока и собственно водоема уменьшался или увеличивался на 5–13% относительно полученных ранее величин (табл. 4).

Следует отметить, что одним из важных следствий климатических изменений стало внутригодовое перераспределение притока в водохранилища. Так, повышение средней зимней температуры воздуха в декабре–марте в современный период (2001–2020 гг.) по сравнению с периодом до 1976 г. составило 2.0–3.0°C, что привело к росту зимнего притока в водохранилища верхнего участка Волги. Так, в Иваньковском и Угличском водохранилищах в январе–марте приток увеличился в два раза по отношению к среднему за

1947–1976 гг. Весенний приток (апрель–май) снизился на 10–25%. В Рыбинском водохранилище максимальное увеличение притока наблюдалось в декабре–марте (в 1.8–2 раза), в апреле–июне – снижение на 10–25%. В Горьковском водохранилище отмечены разнонаправленные изменения притока в течение года: максимальное повышение в марте (на 54%), снижение в мае (13%) и октябре (6%) и отсутствие различий в летний сезон. В Куйбышевском водохранилище наблюдалось наиболее значительное увеличение (в 1.5 раза) притока в ноябре–декабре и марте и уменьшение в период половодья (на 10%). В водохранилищах нижнего участка Волги отмечалось незначительное повышение притока от первого периода ко второму в течение всего года, кроме мая. Наибольший рост (на 35–40%) отмечался в апреле (рис. 4, 5).

Режим уровня

Основными факторами, определяющими в водохранилищах размах колебаний уровня воды и их периодичность, служат: утвержденные отметки уровня воды в соответствии с диспетчерскими правилами регулирования стока гидроузлом; условия формирования стока на водосборе водохранилища; морфологические особенности ложа водоема [23]. При сравнении двух периодов климатических изменений для всех водохранилищ Волги выявлено постепенное повышение уровня предполоводной сработки $Z_{\text{сраб}}$ в среднем от 0.09 м (Саратовское водохранилище) до 1.86 м (Куйбышевское водохранилище). Уровни наполнения $Z_{\text{нап}}$ в современный период по сравнению с уровнями до 1976 г. незначительно уменьшились – в Угличском и Горьковском водохранилищах на 3–12 см, в Саратовском и Волгоградском – на 54–61 см; повысились в Иваньковском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах соответственно на 34, 8 и 79 см. В современный

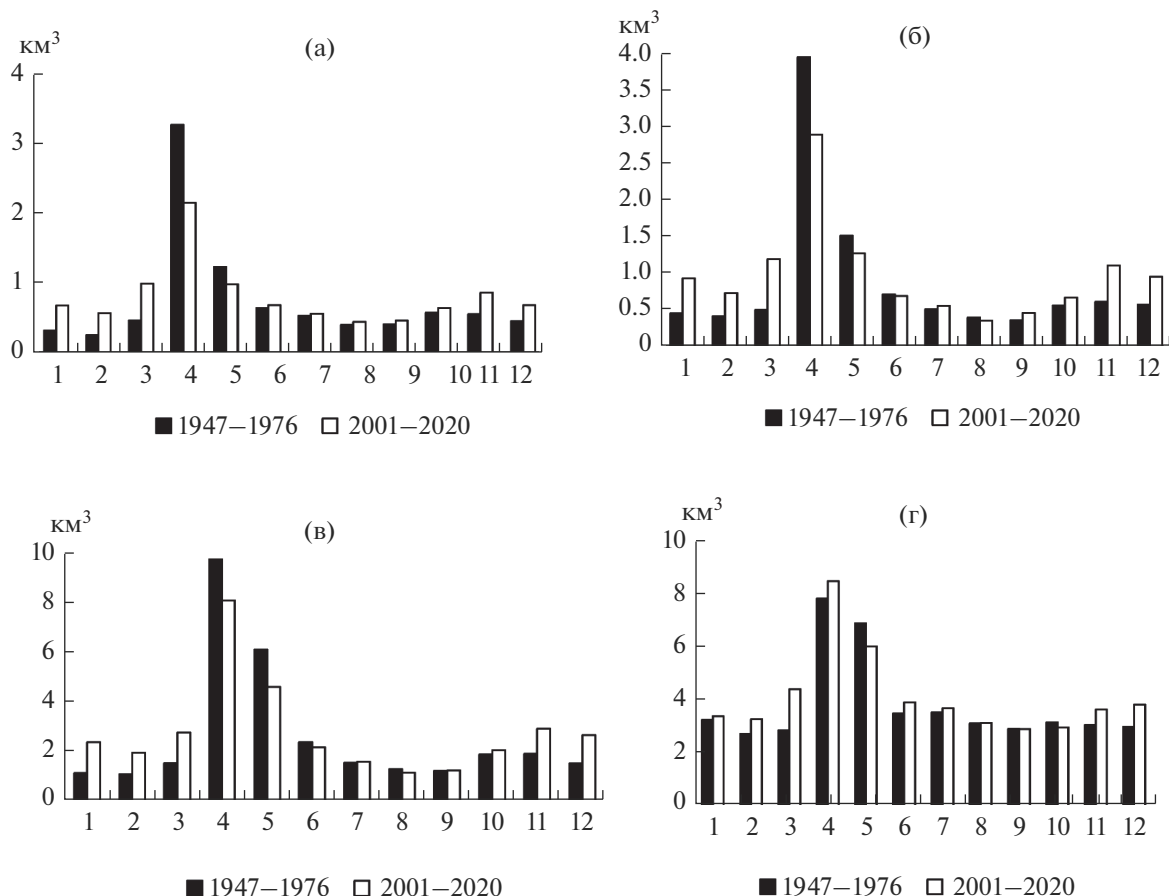


Рис. 4. Динамика притока воды в водохранилища: а – Ивановское, б – Угличское, в – Рыбинское, г – Горьковское.

период отмечена тенденция повышения среднегодового уровня воды $Z_{\text{ср}}$ на водохранилищах верхнего участка Волги и Куйбышевском, что повлекло за собой увеличение их объемов. На Саратовском и Волгоградском водохранилищах $Z_{\text{ср}}$ несколько понизился (табл. 5). Уровень воды водохранилищ в среднем был в маловодные фазы

ниже на 17 см, а в многоводные – выше на 10 см среднего многолетнего.

На водохранилищах верхнего участка Волги и Куйбышевском амплитуда средних многолетних сезонных колебаний уровня воды после 2001 г. уменьшилась в 1.4–1.8 раза. На Саратовском и Волгоградском водохранилищах при незначи-

Таблица 5. Средние многолетние характеристики уровня воды волжских водохранилищ (ΔZ – разница между уровнями после 2001 г. и до 1976 г. Остальные обозначения – в тексте)

Водохранилище	$Z_{\text{сраб}}, \text{ м}$		$\Delta Z, \text{ м}$	$Z_{\text{нап}}, \text{ м}$		$\Delta Z, \text{ м}$	$Z_{\text{ср}}, \text{ м}$		$\Delta Z, \text{ м}$
	до 1976 г.	после 2001 г.		до 1976 г.	после 2001 г.		до 1976 г.	после 2001 г.	
Иваньковское	120.16	121.87	1.71	123.61	123.95	0.34	122.98	123.50	0.52
Угличское	109.95	110.68	0.73	113.03	112.91	-0.12	112.30	112.53	0.23
Рыбинское	98.33	99.81	1.48	101.42	101.50	0.08	100.03	100.58	0.55
Горьковское	82.41	82.98	0.57	83.88	83.85	-0.03	83.59	83.59	0.00
Куйбышевское	48.50	50.36	1.86	51.84	52.63	0.79	50.68	51.68	1.00
Саратовское	27.77	27.86	0.09	28.51	27.90	-0.61	28.05	27.86	-0.19
Волгоградское	14.17	14.57	0.40	15.36	14.82	-0.54	14.71	14.67	-0.04

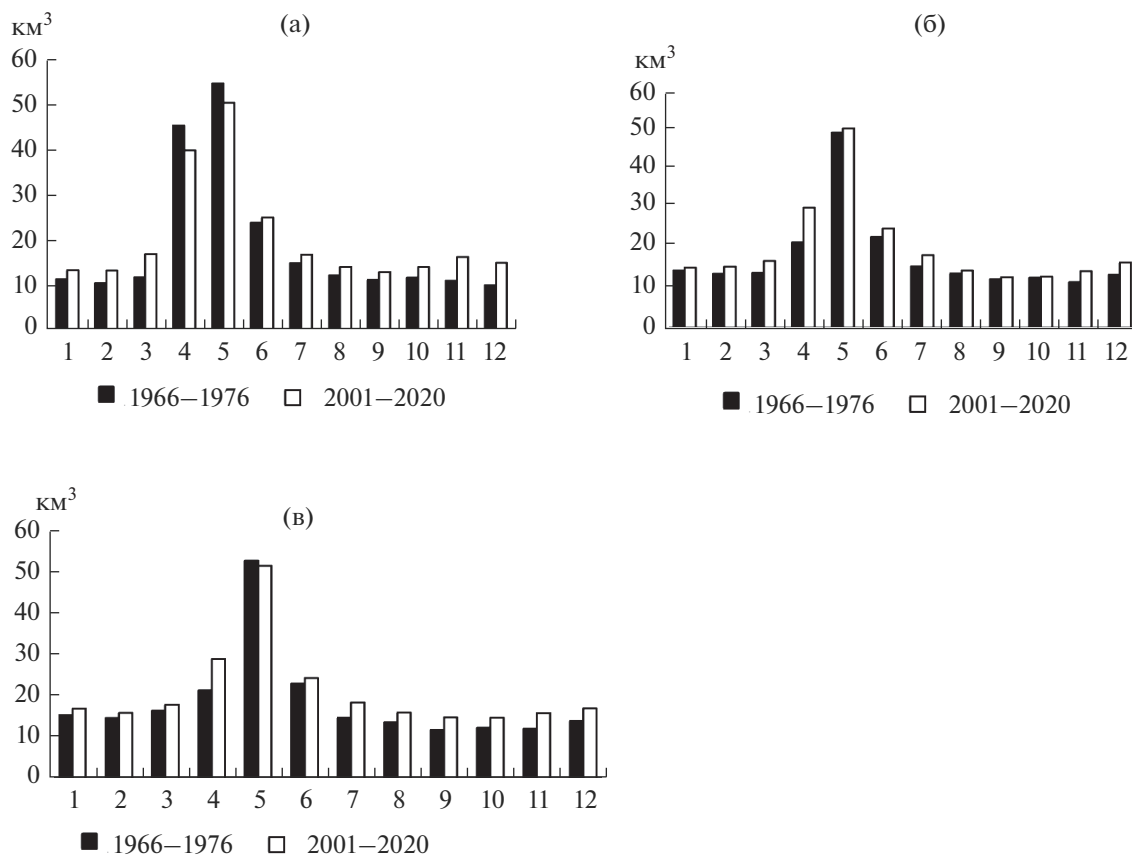


Рис. 5. Динамика притока воды в водохранилища: а – Куйбышевское, б – Саратовское, в – Волгоградское.

тельных средних многолетних сезонных изменениях уровня воды (0.65–1.19 м) амплитуда его колебаний в современный период уменьшилась соответственно в 5.4 и 4.5 раза.

В целях выявления роли притока в изменениях среднемесячного и среднегодового уровня воды в водохранилищах были оценены корреляционные зависимости вида $Z=f(W)$. В результате статистического анализа было выявлено отсутствие значимых корреляций между среднегодовыми значениями Z и W для водохранилищ с высоким K_W и, соответственно, малым τ . Для водохранилищ с объемом >19 км³ (Рыбинское, Куйбышевское, Волгоградское) значения R^2 составили 0.4–0.5 при $F = 28–43$. Корреляционный анализ среднемесячных значений притока и уровня не выявил значимых связей между Z и W для всех водохранилищ волжского каскада. Таким образом, среднемесячные колебания уровня водоемов в течение года определялись в основном режимом работы ГЭС, а колебания среднегодового уровня – в большей степени изменениями объема притока в крупные водохранилища.

Температура водной массы в период открытой воды

Температурный режим водохранилищ определяется теплообменом с атмосферой, морфометрическими особенностями водоемов, динамикой вод (интенсивностью внешнего и внутреннего водообмена) и хозяйственной деятельностью [14, 25]. При этом температура воздуха оказывает основное влияние на изменчивость температуры поверхностного слоя воды в водоемах. В силу относительной мелководности волжских водохранилищ (средняя глубина меняется от 3.4 м в Ивановском водохранилище до 10.1 м в Волгоградском), значительного вертикального турбулентного обмена, обусловленного ветровым волнением, и интенсивного внутреннего водообмена температура водной массы водохранилищ не существенно отличается от температуры поверхностного слоя воды.

В безледный период (апрель–октябрь) на водохранилищах верхнего участка Волги температура водной массы меньше температуры поверхностного слоя на 0.1–0.5°C, тогда как на нижнем участке Волги, в более теплых климатических условиях, $T_{\text{вм}} > T_{\text{пов}}$ на 0.1–0.9°C. Зависимость

температуры водной массы от температуры поверхностного слоя достаточно тесная и выражается уравнением:

$$T_{\text{вм}} = 0.679 + 0.983T_{\text{пов}} (n = 571, R^2 = 0.94).$$

Дальнейший анализ изменений температуры водной массы волжских водохранилищ для двух временных периодов осуществлялся с использованием уравнения регрессии $T_{\text{вм}} = f(T_{\text{возд}})$ (табл. 2). При этом следует отметить, что, несмотря на удовлетворительную корреляционную связь между $T_{\text{вм}}$ и $T_{\text{возд}}$ (относительные ошибки расчета могли достигать 20%), вычисленные значения $T_{\text{вм}}$ могут быть пригодны для их предварительного сравнения друг с другом.

В результате проведенных исследований выявлены следующие изменения $T_{\text{возд}}$ и $T_{\text{вм}}$ в безледный период. Температура воздуха в современном период на береговых МС водохранилищ увеличилась на 0.9–1.5°C. Причем минимальное ее увеличение (на 0.0–0.6°C) зафиксировано в июне и обуславливалось, как указано выше, преобладающим меридиональным переносом холодных воздушных масс. Наибольшее увеличение $T_{\text{вм}}$ (на 1.3–4.2°C) отмечалось в мае на верхнем участке Волги, а также в августе и октябре на нижнем участке Волги (на 1.0–1.3°C). В целом, динамика температуры водных масс волжских водохранилищ в течение сезона происходила аналогично таковым для $T_{\text{возд}}$ (табл. 6).

Следует отметить, что одна из важнейших характеристик термического режима водоемов – теплосодержание их водной массы. Обладая большей теплоемкостью, водная масса способна накапливать значительное количество тепла, уменьшая колебания температуры воды и стабилизируя гидробиологические процессы. В течение сезона колебания теплосодержания определяются изменениями объема водохранилищ и температуры воды. Интенсивное накопление тепла водной массой волжских водохранилищ происходит в мае и продолжается до июля. В августе с началом периода охлаждения водоемов начинается постепенная отдача тепла, которая приводит к началу ледостава и сокращению теплосодержания на 40–60% (табл. 7).

В современный период в связи с потеплением климата наибольшее увеличение теплосодержания водной массы отмечается в водохранилищах верхнего участка Волги – в среднем на 24%. Причем в весенние месяцы такое увеличение может достигать 150–190%. Осенью за счет более продолжительного теплого сезона теплосодержание увеличивается на 11–27%. На водохранилищах нижнего участка Волги увеличение теплосодержания по сравнению с периодом до потепления более равномерно в течение безледного периода. На Куйбышевском водохранилище теплосодер-

жание водной массы постепенно возрастает от весны к осени. На Саратовском и Волгоградском водохранилищах из-за некоторого уменьшения объема водоемов в мае и июне накопление тепла в воде меньше на 2–6% и постепенно увеличивается к осени до 11% (табл. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальное потепление в XX–XXI вв., вызванное либо естественными колебаниями климатической системы, либо антропогенным воздействием, связанным с повышением концентрации в атмосфере парниковых газов вследствие техногенных выбросов, – факт, инструментально подтвержденный данными метеорологических наблюдений [9]. Прогноз изменения гидрометеорологического режима отдельных территорий и расположенных на них водных объектов в результате потепления климата осуществляется с использованием различных климатических моделей, которые в настоящее время дают лишь неоднозначное ориентировочное представление о возможных трансформациях наземных и водных экосистем. Согласно Второму оценочному докладу Росгидромета [1], в ближайшие десятилетия наиболее вероятно незначительное (в пределах 5%) увеличение годового стока, что находится в пределах его естественной изменчивости. Расчеты по ансамблю из 11 климатических моделей [9] при реализации наихудшего сценария потепления климата дают уменьшение среднегодового стока Волги к середине и концу XXI в. на 7–10%. С другой стороны, А.Г. Георгиади и др. [2] прогнозируют при реализации наихудшего сценария изменения климата вероятное увеличение стока Волги к середине XXI в. в половодье на 17, зимой на 6 и в летне-осенний период – на 10%.

Проведенные исследования показывают, что к 2020 г. среднегодовая температура воздуха на побережье водохранилищ увеличилась на 1.3–1.8°C, а среднегодовой приток возрос на 12.4%, т. е. экосистемы волжских водохранилищ по гидрометеорологическому режиму выходят за пределы самого мягкого сценария потепления климата. Прогноз изменений температуры водной массы водоемов в будущем крайне затруднителен из-за сложности адекватной оценки составляющих теплового и водного баланса водохранилищ. Также неизвестны и прогнозы изменений биотических звеньев экосистем волжских водохранилищ в результате реализации различных сценариев потепления климата. В связи с этим одним из ключевых вопросов в изучении функционирования экосистем водохранилищ Волги в меняющихся условиях внешней среды остается ежегодный мониторинг гидрологических и гидробиологических процессов этих сложных антропогенных водных объектов.

Таблица 6. Среднемесячная температура воздуха и водной массы (°С) – до 1976 г. ($T_{\text{возд1}}$, $T_{\text{вм1}}$), после 2001 г. ($T_{\text{возд2}}$, $T_{\text{вм2}}$), разница между их значениями в эти периоды (соответственно $\Delta T_{\text{возд}}$, $\Delta T_{\text{вм}}$) (прочерк – отсутствие данных)

Параметр	Месяц							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	средняя за V–X
Иваньковское водохранилище								
$T_{\text{возд1}}$	4.3	11.3	15.9	17.4	15.7	10.0	4.1	11.3
$T_{\text{возд2}}$	6.0	13.3	16.3	19.4	17.2	11.6	5.1	12.7
$T_{\text{вм1}}$	3.3	11.1	17.9	20.2	18.8	13.1	6.3	12.9
$T_{\text{вм2}}$	6.8	15.3	18.7	22.3	19.9	13.4	5.8	14.6
$\Delta T_{\text{возд}}$	1.6	2.0	0.3	2.0	1.6	1.6	0.9	1.4
$\Delta T_{\text{вм}}$	3.6	4.2	0.9	2.1	1.1	0.3	–0.5	1.7
Угличское водохранилище								
$T_{\text{возд1}}$	4.1	11.2	15.9	17.4	15.8	10.5	4.2	11.3
$T_{\text{возд2}}$	5.0	12.7	15.9	19.1	17.0	11.6	4.8	12.3
$T_{\text{вм1}}$	8.1	14.0	18.0	19.2	17.9	13.4	8.2	14.1
$T_{\text{вм2}}$	8.8	15.2	17.9	20.6	18.8	14.3	8.7	14.9
$\Delta T_{\text{возд}}$	0.9	1.5	–0.1	1.7	1.1	1.1	0.6	1.0
$\Delta T_{\text{вм}}$	0.8	1.3	0.0	1.4	0.9	0.9	0.5	0.8
Рыбинское водохранилище								
$T_{\text{возд1}}$	3.0	10.3	15.5	17.2	15.7	10.0	3.7	10.8
$T_{\text{возд2}}$	4.1	12.0	15.9	18.6	16.3	10.9	4.2	11.7
$T_{\text{вм1}}$	2.0	8.9	15.3	18.3	18.3	12.9	5.6	11.6
$T_{\text{вм2}}$	3.8	11.1	16.7	20.4	19.0	13.3	7.0	13.0
$\Delta T_{\text{возд}}$	1.1	1.7	0.4	1.4	0.6	0.9	0.5	0.9
$\Delta T_{\text{вм}}$	1.8	2.1	1.4	2.1	0.7	0.4	1.4	1.4
Горьковское водохранилище								
$T_{\text{возд1}}$	–	11.7	16.0	18.2	16.2	10.3	3.5	12.7
$T_{\text{возд2}}$	–	13.3	16.6	19.5	17.3	11.6	4.6	13.8
$T_{\text{вм1}}$	–	12.5	16.9	19.1	17.1	11.2	4.3	13.5
$T_{\text{вм2}}$	–	14.1	17.5	20.3	18.2	12.5	5.5	14.7
$\Delta T_{\text{возд}}$	–	1.6	0.6	1.2	1.1	1.3	1.2	1.2
$\Delta T_{\text{вм}}$	–	1.6	0.6	1.2	1.1	1.3	1.2	1.2
Куйбышевское водохранилище								
$T_{\text{возд1}}$	–	13.4	17.9	19.4	17.7	11.6	3.9	14.0
$T_{\text{возд2}}$	–	14.7	18.0	20.7	19.0	12.8	5.4	15.1
$T_{\text{вм1}}$	–	14.8	18.7	20.0	18.6	13.3	6.7	15.3
$T_{\text{вм2}}$	–	15.9	18.8	21.1	19.7	14.3	8.0	16.3
$\Delta T_{\text{возд}}$	–	1.3	0.1	1.3	1.3	1.2	1.5	1.1
$\Delta T_{\text{вм}}$	–	1.1	0.1	1.1	1.1	1.1	1.3	1.0
Саратовское водохранилище								
$T_{\text{возд1}}$	–	15.0	19.4	20.9	20.4	13.4	5.0	15.7
$T_{\text{возд2}}$	–	16.2	19.8	22.4	21.9	14.8	6.9	17.0
$T_{\text{вм1}}$	–	14.9	17.6	18.5	18.1	13.8	8.7	15.3
$T_{\text{вм2}}$	–	15.6	17.8	19.4	19.1	14.7	9.8	16.1
$\Delta T_{\text{возд}}$	–	1.2	0.4	1.5	1.6	1.4	1.8	1.3
$\Delta T_{\text{вм}}$	–	0.7	0.2	0.9	1.0	0.9	1.1	0.8
Волгоградское водохранилище								
$T_{\text{возд1}}$	–	15.9	20.5	22.1	20.8	14.3	6.0	16.6
$T_{\text{возд2}}$	–	17.1	21.1	23.8	22.8	15.9	7.8	18.1
$T_{\text{вм1}}$	–	15.8	18.7	19.7	18.9	14.8	9.5	16.2
$T_{\text{вм2}}$	–	16.6	19.1	20.8	20.2	15.8	10.6	17.2
$\Delta T_{\text{возд}}$	–	1.3	0.6	1.7	2.0	1.6	1.8	1.5
$\Delta T_{\text{вм}}$	–	0.8	0.4	1.1	1.2	1.0	1.1	0.9

Таблица 7. Теплосодержание (10^9 Дж) водной массы водохранилищ Волжского каскада в разные периоды (Θ_1 , Θ_2 – до 1976 г. и после 2001 г. соответственно; $\Delta\Theta$ – разница теплосодержания водной массы между двумя периодами, прочерк – отсутствие данных)

Параметр	Месяц							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	среднее за V–X
Иваньковское водохранилище								
Θ_1	9.0	46.4	71.0	88.7	80.1	53.5	26.0	53.5
Θ_2	26.6	70.8	85.4	100.1	87.9	59.6	25.8	65.2
$\Delta\Theta$, %	194	53	20	13	10	11	–1	43
Угличское водохранилище								
Θ_1	30.1	73.4	91.5	96.5	89.6	66.2	40.1	69.6
Θ_2	35.3	78.2	91.6	105.0	96.0	73.0	44.4	74.8
$\Delta\Theta$, %	17	7	0	9	7	10	11	9
Рыбинское водохранилище								
Θ_1	118.7	810.0	1474.1	1681.1	1572.9	1026.7	420.6	1014.9
Θ_2	295.1	1074.1	1632.4	1910.0	1647.4	1059.9	533.9	1164.7
$\Delta\Theta$, %	149	33	11	14	5	3	27	34
Горьковское водохранилище								
Θ_1	–	453.1	620.4	700.1	626.7	410.7	158.2	494.9
Θ_2	–	507.8	626.1	727.6	651.4	445.4	193.9	525.4
$\Delta\Theta$, %	–	12	1	4	4	8	23	9
Куйбышевское водохранилище								
Θ_1	–	3203.4	3955.1	4158.2	3646.3	2474.0	1214.3	3108.5
Θ_2	–	3439.8	4339.5	4907.1	4411.3	3047.4	1656.3	3633.6
$\Delta\Theta$, %	–	7	10	18	21	23	36	19
Саратовское водохранилище								
Θ_1	–	852.8	1010.3	996.6	967.5	738.9	468.1	839.0
Θ_2	–	833.6	947.1	1020.7	1004.2	780.1	519.1	850.8
$\Delta\Theta$, %	–	–2	–6	2	4	6	11	2
Волгоградское водохранилище								
Θ_1	–	2155.3	2457.1	2518.8	2418.2	1853.6	1214.1	2102.8
Θ_2	–	2093.8	2410.7	2693.8	2580.0	2007.3	1349.8	2189.2
$\Delta\Theta$, %	–	–3	–2	7	7	8	11	5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
2. Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Кашутина Е.А. Гидрологические изменения в регионах русской равнины в теплые эпохи геологического прошлого и сценарного будущего // Изв. РАН. Сер. географ. 2018. № 5. С. 70–80.
<https://doi.org/10.1134/S2587556618050060>
3. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Отв. редактор К.К. Эдельштейн. М.: Перо, 2015. 286 с.
4. Глобальный климат в 2001–2010 годы. Десятилетие экстремальных климатических явлений // Изменение климата. Информ. бюл. 2014. № 47. С. 9–10.
5. Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6–28.
<https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-4-1>
6. Гречушников М.Г. Результаты численного моделирования изменения режима Можайского и Истринского водохранилищ при реализации сценария А2 глобального потепления // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 86–97.
7. Гречушников М.Г., Эдельштейн К.К. Возможные изменения гидрологического режима Рыбинского водохранилища при потеплении климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2012. № 6. С. 61–67.
8. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
9. Евстигнеев В.М., Кислов А.В., Сидорова М.В. Влияние климатических изменений на годовой сток рек Восточно-Европейской равнины в XXI в. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2010. № 2. С. 3–10.
10. Законнова А.В. Климатические изменения термического режима Рыбинского водохранилища // Тр. Института биологии внутренних вод РАН. 2021. Вып. 94 (97). С. 7–16.
<https://doi.org/10.47021/0320-3557-2021-94-7-16>
11. Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Коронкевич Н.И. Весенний поверхностный склоновый сток на Русской равнине в годы различной водности // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 1. С. 37–46.
<https://doi.org/10.31857/S2587556620010100>
12. Кузин П.С. Циклические колебания стока рек северного полушария. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 180 с.
13. Литвинов А.С. Гидрологические процессы и экологические условия в водохранилищах. Mauritius: LAP, 2018. 113 с.
14. Литвинов А.С., Рошупко В.Ф. Термическая характеристика водохранилищ Волжского каскада // Формирование и динамика полей гидрологических и гидрохимических характеристик во внутренних водоемах и их моделирование. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 3–24.
15. Научно-прикладной справочник: Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ / Под ред. В.Ю. Георгиевского. М.: Офорт, 2017. 132 с.
16. Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: РИАЛ, 2021. 190 с.
17. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада, ЛДТ, 2013. 144 с.
18. Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Гречушников М.Г., Соломонова И.В. Особенности гидрологического режима Цимлянского водохранилища при климатических изменениях в бассейне Дона // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 111–121.
<https://doi.org/10.7868/S0321059616020127>
19. Попова В.В., Георгиади А.Г. Спектральные оценки связи изменчивости стока волги и североатлантического колебания в 1882–2007 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 2. С. 47–59.
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-47-59>
20. Попова В.В., Бабина Е.Д., Георгиади А.Г. Климатические факторы изменчивости стока Волги во второй половине XX – начале XXI вв // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 63–72.
<https://doi.org/10.31857/S2587-55662019463-72>
21. Центр регистра и кадастра. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. 2014. <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 13.01.2022)
22. Шашуловский В.А., Мосияш С.С. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2010. 250 с.
23. Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
24. Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. Учебник для вузов. М.: Перо, 2014. 399 с.
25. Экологические проблемы Верхней Волги / Отв. ред. А.И. Копылов. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. 427 с.
26. Adrian R., O'Reilly C.M., Zagarese H., Baines S.B., Hessen D.O., Keller W., Livingstone D.M., Sommaruga R., Straile D., Van Donk E., Weyhenmeyer G.A., Winder M. Lakes as sentinels of climate change // Limnol. Oceanogr. 2009. 54. 6. Pt 2. P. 2283–2297.
27. Carvalho-Santos C., Monteiro A.T., Azevedo J.C., Honrado J.P., Nunes J.P. Climate Change Impacts on Water Resources and Reservoir Management: Uncertainty and Adaptation for a Mountain Catchment in Northeast Portugal // Water Resour. Manage. 2017. V. 31. P. 3355–3370.
28. Fang X., Stefan H.G. Simulations of climate effects on water temperature, dissolved oxygen, and ice and snow covers in lakes of the contiguous United States under past and future climate scenarios // Limnol. Oceanogr. 2009. V. 54. 6. Pt 2. P. 2359–2370.
29. Firoozi F., Roozbahani A., Massah Bavani A.R. Developing a framework for assessment of climate change impact on thermal stratification of dam reservoirs // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2020. V. 17. P. 2295–2310.

30. *Kryzhov V.N.* Climate extremes of the 2019/2020 winter in Northern Eurasia: contributions by the climate trend and interannual variability related to the arctic oscillation // *Russian Meteorol. Hydrol.* 2021. Т. 46. № 2. P. 61–68.
31. *Kryzhov V.N., Gorelits O.V.* The arctic oscillation and its impact on temperature and precipitation in Northern Eurasia in the 20th century // *Russian Meteorol. Hydrol.* 2015. Т. 40. № 11. P. 711–721.
32. *Rimmer A., Gal G., Opher T., Lechinsky Y., Yacobi Y.Z.* Mechanisms of long-term variations in the thermal structure of a warm lake // *Limnol. Oceanogr.* 2011. V. 56. 3. P. 974–988.
33. *Williamson C.E., Saros J.E., Vincent W.F., Smol J.P.* Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2009. V. 54. 6. Pt 2. P. 2273–2282.
34. *Williamson C.E., Brentrup J.A., Zhang J., Renwick W.H., Hargreaves B.R., Knoll L.B., Overholt E.P., Rose K.C.* Lakes as sensors in the landscape: Optical metrics as scalable sentinel responses to climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2014. V. 59. 3. P. 840–850.
35. *Zhang Y., Wu Z., Liu M., He J., Shi K., Wang M., Yu Z.* Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China // *Limnol. Oceanogr.* 2014. V. 59. 4. P. 1193–1202.