

Гидрология и гидрохимия

УДК551.58:551.464.6(285.247.413.5)

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А. В. Законнова

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН
152742 пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл. e-mail: zak@ibiw.ru*
Поступила в редакцию 26.01.2021

По данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории и архива лаборатории гидрологии ИБВВ РАН исследована сезонная изменчивость основного климатического показателя – температуры воздуха (мст. Рыбинск, ГМО) и температуры воды Рыбинского водохранилища на современном этапе потепления (2001–2019 гг.). Установлено изменение сроков наступления и окончания климатических сезонов года и увеличение их продолжительности. Отмечено, что в современный период во все месяцы года средняя температура приземного воздуха была выше климатической нормы (1960–1990 гг.). В вегетационный период (условно май–октябрь) наибольшее ее повышение наблюдалось в июле – 1.5°C, мае и сентябре – 1.2°C. Показано, что в современный период интенсивного потепления в весенний, летний и осенний сезоны года среднедекадная температура воды увеличилась по сравнению с нормой. Наибольшие положительные аномалии отмечены в 2–3 декаде мая – 2.8–2.3°C и июля – 2.0°C. Данные мониторинга температуры воды водохранилища свидетельствуют о росте числа лет с аномальными термическими условиями, что связано с изменением климата. Отмечено более раннее установление температурной стратификации водных масс (конец мая) и уменьшение разности температуры поверхностного и придонного слоев воды.

Ключевые слова: потепление климата, Рыбинское водохранилище, температура воздуха, температура воды, сезонная динамика.

DOI: 10.47021/0320-3557-2021-94-7-16

ВВЕДЕНИЕ

На Европейской территории России потепление климата продолжается в целом за год и во все сезоны, темпы которого намного превышают средние по Земному шару. Средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха в 1976–2019 гг. составила 0.47°C/10 лет, что в 2.5 раза больше скорости роста глобальной температуры [Доклад..., 2018 (Doklad..., 2018)]. В условиях глобального потепления особенно актуальным становится исследование изменений климатических характеристик на региональном уровне – температуры воздуха и температуры воды водоема, которые тесно связаны.

При исследовании термического режима Можайского водохранилища установлено устойчивое повышение температуры воды за вегетационный период (1980–1990 гг.) на 0.4°C и увеличение длительности вегетационного периода [Пуклаков, Гречушникова, 2001 (Puklakov, Grechushnikova, 2001)].

В Каневском и Киевском водохранилищах за весь период существования отмечено повышение средней температуры водных масс на 1.5–2.0°C [Вандюк, 2010 (Vandyuk, 2010)].

В оз. Ильмень при анализе структуры многолетних колебаний температуры воды

в гидрологические сезоны выявлены значительные различия в прогреве водных масс в отдельные годы и отмечено повышение их температуры в весенний, летний и осенний сезоны, начиная с конца XX века [Бойцов, Несветова, 2017 (Boitsov, Nesvetova, 2010)].

Температура воды является важной гидроэкологической характеристикой, которая влияет на ряд гидрологических и биологических процессов. От температуры воды зависит содержание в водохранилище растворенного кислорода, а следовательно, интенсивность процессов самоочищения, выживаемость и видовой состав гидробионтов.

Анализ закономерностей изменений термического режима Рыбинского водохранилища в условиях потепления приобретает большое значение. Работа выполнена с учетом более ранних работ [Литвинов, Рощупко, 2010 (Litvinov, Roshchupko, 2010); Litvinov, Zakonnova, 2012; Пырина и др., 2018 (Pyrina et al., 2018)], где временные ряды анализировались до 2015 г., и является продолжением исследований, включая 2019 год.

Цель работы – анализ сезонных изменений температуры воздуха и воды Рыбинского водохранилища в современный период.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные Рыбинской гидрометеорологической обсерватории (РГМО) о среднемесячной температуре воздуха (МС Рыбинск, ГМО) и средней (декадной, месячной) температуре воды акватории Рыбинского водохранилища за 1947–2019 гг. Также анализировалась температура воды, измеренная на 6 станциях стандартных рейсов, выполняемых сотрудниками ИБВВ РАН 1–

2 раза в месяц в течение вегетационного периода 2001–2019 гг. Стандартные станции – Коприно и Молога находятся в Волжском плесе, Наволок, Измайлово, Средний Двор и Брейтово – в Главном (рис. 1). Температура воды измерялась прибором “30 saliniti, conductiviti, temperature” от поверхностного слоя (0.5 м) до придонного через 1 м.

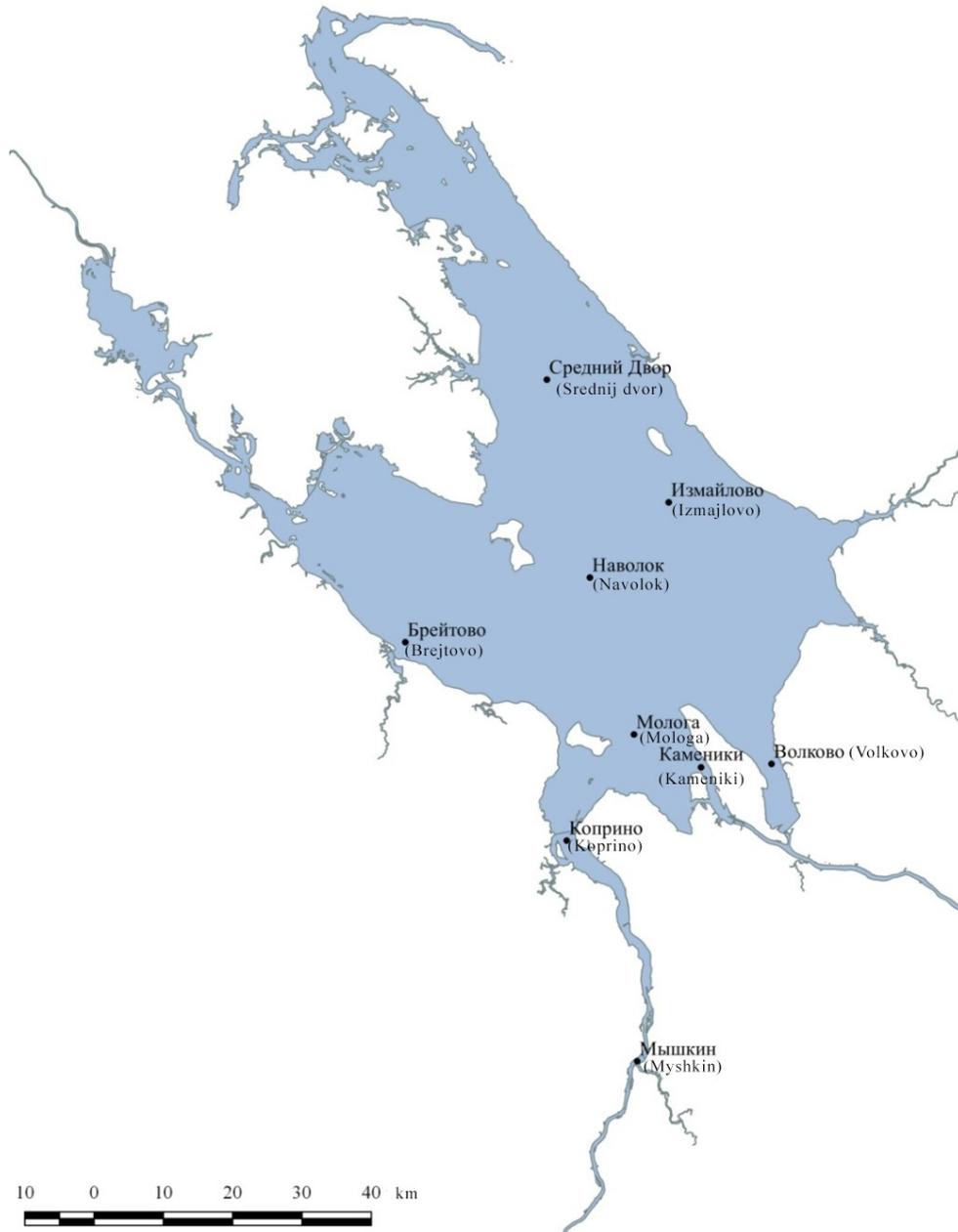


Рис. 1. Схема стандартных станций Рыбинского водохранилища.

Fig 1. Scheme of standard stations in the Rybinsk Reservoir.

Анализ термического режима водохранилища выполнен за современный период (2001–2019 гг.) в сравнении с периодом 1961–1990 гг., принятым Всемирной метеорологической организацией (ВМО) за климатическую

норму. Особенности межгодовой изменчивости температуры воды рассмотрены отдельно для весеннего (3-я декада апреля–2-я декада мая), летнего (3-я декада мая–1-я декада сентября) и осеннего (2-я декада сентября–1-я де-

када ноября) гидрологических сезонов. Основным показателем для их выделения послужила среднедекадная температура воды.

Для оценки роли потепления в изменении температуры воздуха и воды рассчитаны аномалии – отклонения от среднего значения за базовый период (1961–1990 гг.). Многолет-

ние изменения температуры воздуха анализировались по линейным трендам. Статистическая значимость линейного тренда оценивалась по величине коэффициента детерминации, показывающего вклад линейного тренда в общую изменчивость характеристики. При объеме выборки 50 лет и более $R^2 > 0.08$ [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температура воздуха. За период 1976–2019 гг. на побережье Рыбинского водохранилища среднегодовая температура воздуха повышалась со скоростью $0.50^\circ\text{C}/10$ лет. Оценки линейных трендов, характеризующие тенден-

цию изменений среднесезонных температур воздуха, отличаются для Европейской части России и Рыбинского водохранилища для весны и в значительной степени для зимы (табл. 1).

Таблица 1. Оценки линейного тренда среднесезонных температур приземного воздуха за 1976–2019 гг.

Table 1. The Estimates of the linear Trend of mean seasonal surface air Temperatures for 1976–2019

Регион Region	Весна / Spring		Лето / Summer		Осень / Autumn		Зима / Winter	
	<i>b</i> , °C/10лет <i>b</i> , °C/10years	<i>D</i> , %	<i>b</i> , °C/10лет <i>b</i> , °C/10years	<i>D</i> , %	<i>b</i> , °C/10лет <i>b</i> , °C/10years	<i>D</i> , %	<i>b</i> , °C/10лет <i>b</i> , °C/10years	<i>D</i> , %
Европейская часть России*	0.44	23	0.42	64	0.52	26	0.39	10
Рыбинское водохранилище, мст Рыбинск, ГМО	0.32	10	0.42	20	0.48	24	0.77	14

Примечание. “*” [Бюллетень мониторинга..., 2019 (Byulleten' monitoringa..., 2019)], *b* – коэффициент линейного тренда, *D* – вклад тренда в дисперсию ряда.

Note. “*” [Byulleten' monitoringa..., 2019], *b* – linear trend coefficient, *D* – the trend contribution to the variance of the series.

Потепление регионального климата проявилось в изменении сроков наступления и продолжительности климатических сезонов года. Известно, что за начало весны принята дата перехода среднесуточной температуры воздуха к положительным значениям. За период 2001–2019 гг. на МС Рыбинск, ГМО средняя дата перехода температуры воздуха через 0°C весной 27 марта, осенью – 29 ноября, продолжительность периода с положительными температурами воздуха составила 238 дней (в 1950–1975 гг. 213 дней). Продолжительность периода с температурой воздуха $\geq 10^\circ\text{C}$ также увеличилась – 151 день (2 мая – 29 сентября). Сроки наступления летнего сезона (температура воздуха $\geq 15^\circ\text{C}$) сместились на более ранние весной (18 мая) и поздние

осенью (3 сентября) и средняя продолжительность лета составила 109 дней. Продолжительность осени увеличилась с 74 до 91 дня.

По данным Ярославского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в бассейне Рыбинского водохранилища последние десятилетия характеризуются повышением температуры воздуха на $2\text{--}3^\circ\text{C}$ в январе, $1\text{--}2^\circ\text{C}$ в июле и увеличением на месяц периода с положительными температурами воздуха [Экологический атлас..., 2015 (Ekologicheskiiy atlas..., 2015)].

В современный период (2001–2019 гг.) на побережье водохранилища во все месяцы года средняя температура воздуха была выше нормы (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики температуры воздуха, ($^\circ\text{C}$), мст. Рыбинск, ГМО

Table 2. Characteristics of air temperature, ($^\circ\text{C}$), Rybinsk weather station, HMO

Период / Period	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год / Year
1961–1990	-11.4	-9.5	-3.9	3.7	11.4	15.7	17.9	15.9	10.3	4.2	-2.2	-7.5	3.7
2001–2019	-8.6	-8.2	-3.1	4.7	12.6	16.2	19.4	17.0	11.5	4.8	-0.6	-5.3	5.0
Макс.	-4.2	-1.3	3.1	8.7	15.4	19.3	24.0	19.2	13.3	7.8	3.0	-2.7	6.2
Год	2005	2016	2007	2001	2010	2013	2010	2010	2015	2008	2013	2003	2015
Мин.	-15.7	-16.7	-10.3	2.2	8.4	12.8	15.5	14.6	9.6	1.0	-4.5	-14.3	4.2
Год	2010	2006	2013	2009	2017	2003	2019	2019	2008	2002	2016	2002	2012

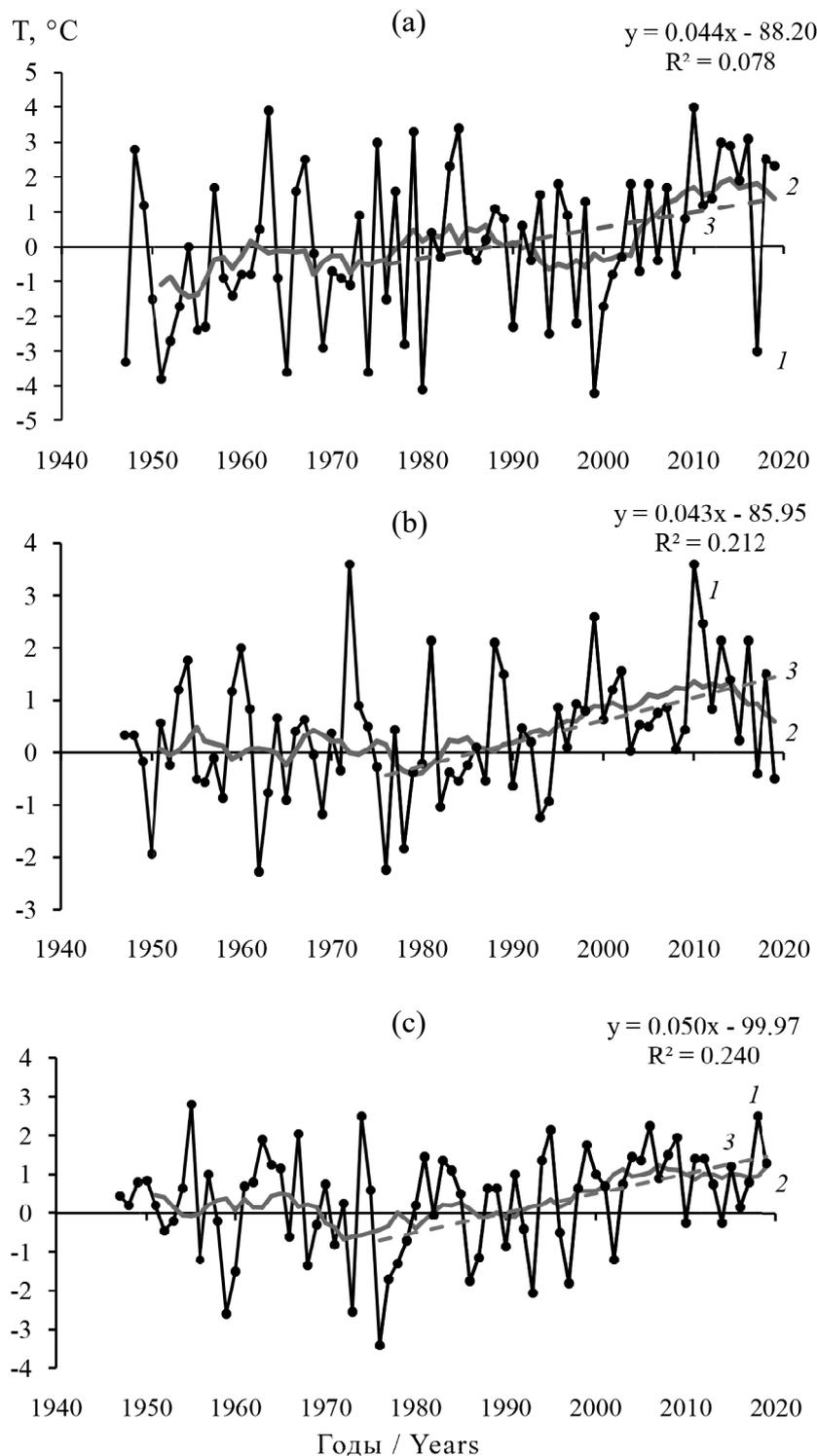


Рис. 2. Сезонные аномалии температуры воздуха (1), мст. Рыбинск, ГМО. 1947–2019 гг. 2 – 11-летнее скользящее среднее, 3 – линейный тренд за 1976–2019 гг. а – весна (май), б – лето (июль–август), с – осень (сентябрь–октябрь).

Fig. 2. Seasonal anomalies of air temperature (1), st. Rybinsk, HMO. 1947–2019. 2 – 11-year moving average, 3 – a linear trend for 1976–2019. а – Spring (May), б – Summer (July–August), с – Autumn (September–October).

В многолетнем плане сезонные изменения температуры воздуха не однозначны (рис. 2). Для весны (май) установлен положительный линейный тренд и выделены 2 периода отрицательных аномалий (1947–1960 и 1973–1984 гг.). В современный период отме-

чены положительные аномалии (максимальная 4°C в 2010 г.). В летний сезон (июнь–август) в период потепления установлен значимый положительный тренд изменения температуры воздуха со средней скоростью 0.42°C/10 лет. Среднесезонная температура воздуха выше

нормы отмечалась с 1995 г. Начиная с 2010 г., когда наблюдались аномально высокие ее значения в июле и августе, кривая хода имеет пилообразный вид с тенденцией к снижению (отрицательная аномалия в 2017 г. -0.4 , в 2019 г. -0.5°C). В осенний период (сентябрь–октябрь) динамика средней температуры воздуха характеризуется резкими колебаниями от года к году, которые происходили на фоне общего тренда ее повышения со средней скоростью $0.50^{\circ}\text{C}/10$ лет (1976–2019 гг.) и переходом к положительной фазе в 1980 г. С 2003 г. отмечены положительные аномалии температуры (кроме 2010 и 2014 гг. – отрицательная аномалия составила -0.3°C).

Температура воды. Изменение климатических условий на побережье водохранилища привело к синхронному повышению температуры воды. Оценка реакции термического режима Рыбинского водохранилища на региональные изменения климата показала, что в период потепления 1976–2019 гг. выявлена тенденция повышения средней за май–октябрь температуры воды со скоростью $0.72^{\circ}\text{C}/10$ лет. Максимальная скорость роста отмечена в мае – $1.20^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Таблица 3. Характеристики температуры воды Рыбинского водохранилища весной, $^{\circ}\text{C}$

Table 3. Characteristics of the water Temperature of the Rybinsk Reservoir in Spring, $^{\circ}\text{C}$

Характеристика Characteristic	Апрель / April		Май / May	
	Декада / Decade			
	3-я		1-я	2-я
	1961–1990 гг.			
Средняя (норма)	2.2		5.4	9.4
	2001–2019 гг.			
Средняя	3.7		8.2	12.2
Максимальная	7.3 (2014 г.)		13.2 (2016 г.)	17.2 (2018 г.)
Минимальная	0.1 (2003, 2012 гг.)		2.9 (2003 г.)	7.9 (2004 г.)

Для весны характерна гомотермия с интенсивным прогревом водной толщи при теплой погоде и медленным охлаждением при возврате холодов. Однако в отдельные годы в конце мая температура поверхностного слоя воды повышалась до 18 – 19°C , придонного – 12°C (на ст. Брейтово – 22 , 15°C , соответственно) (рис. 3а). В водохранилище температурное расслоение водной толщи – явление обычное, но при мелководности водоема (средняя глубина 5.4 м) и высокой ветровой активности в большинстве случаев кратковременное [Буторин и др., 1982 (Butorin et al., 1982)]. Следует отметить, что в современный период в отдельные годы летние температурные условия наблюдались уже в третьей декаде мая, что свидетельствует о потеплении регионального климата.

Весна. По многолетним данным переход температуры воды водохранилища через 4°C весной наблюдается 7 мая, в современный период дата сместилась на 2 мая [Литвинов и др., 2018 (Litvinov, et al., 2018)]. Переход температуры воды через 4°C может наблюдаться на 2 недели раньше или позже многолетнего срока. Для весеннего периода характерно сравнительно медленное накопление тепла, повышение температуры воды от значений, близких к 0°C до 8 – 9°C , а также более низкая температура воды по сравнению с температурой воздуха. Интенсивное повышение температуры воды начинается в мае – 4.0 – 5.0°C за декаду (табл. 3). Увеличение средней температуры воды мая на 2.4°C можно объяснить ростом суммарной солнечной радиации за период 1990–2013 гг. со скоростью 29 МДж/ $\text{m}^2/10$ лет [Zakonnova, Litvinov, 2017]. В этом месяце в большой степени проявляется зависимость прогрева воды от метеорологических условий. В отдельные годы при вторжении арктических холодных масс температура воды в третьей декаде мая по сравнению с первой понижается до 2°C за декаду (1969, 1978, 1993 гг.).

Лето. В Рыбинском водохранилище за начало лета принято появление устойчивой температурной стратификации при среднедекадных температурах воды 13 – 14°C [Буторин и др., 1982 (Butorin et al., 1982)]. Накопление тепла в водохранилище происходит, начиная с третьей декады мая при средней температуре воды 14.7°C и продолжается до 2–3 декады июля, когда отмечается максимальный прогрев водных масс. Начиная с 1-ой декады августа, идет охлаждение водохранилища, наиболее интенсивное в 3-ей декаде месяца. В современный период в течение летнего сезона среднедекадная температура воды была выше нормы. Наибольшие различия наблюдались во 2–3 декаде июля – 2.0°C . Отмечено увеличение амплитуды колебаний среднедекадной температуры воды (табл. 4).

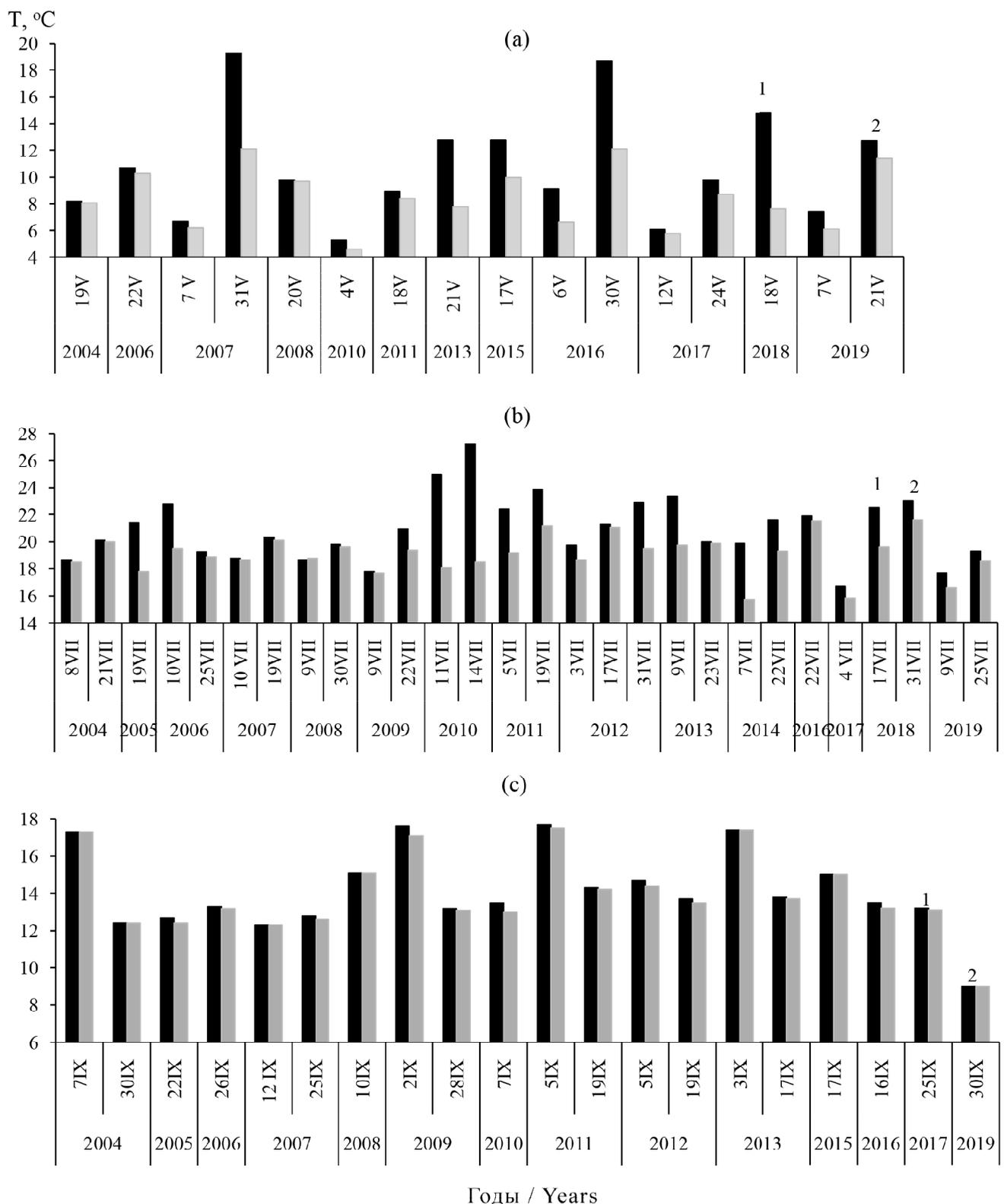


Рис. 3. Динамика температуры поверхностного (1) и придонного (2) слоя воды. 2004–2019 гг. Температура воды рассчитана как средняя на 6-ти стандартных станциях. а – весна (май), б – лето (июль–август), в – осень (сентябрь–октябрь).

Fig. 3. Dynamics of the surface (1) and near-bottom (2) water temperature. 2004–2019. The water temperature is calculated as an average at six standard stations. а – Spring (May), б – Summer (July–August), в – Autumn (September–October).

Таблица 4. Характеристики температуры воды Рыбинского водохранилища в летний период, °С**Table 4.** Characteristics of the water temperature of the Rybinsk Reservoir in Summer, °C

Характеристика Characteristic	Май May	Июнь June			Июль July			Август August			Сентябрь September
	Декада / Decade										
	3-я	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я	1-я
1961–1990 гг.											
Средняя (норма)	12.4	15.0	16.3	18.2	18.9	19.9	20.1	19.7	18.5	16.9	15.1
2001–2019 гг.											
Средняя	14.7	16.4	17.5	19.3	20.4	21.9	22.1	21.4	20.2	18.4	16.0
Максимальная	19.2	21.5	19.7	23.3	24.3	26.9	25.9	25.6	23.9	20.2	19.4
Год	2007	2013	2013	2013	2013	2010	2010	2010	2010	2007	2018
Минимальная	8.7	11.4	12.7	14.6	17.1	18.1	19.6	16.0	16.0	16.3	13.2
Год	2004	2003	2003	2003	2017	2017	2015	2019	2019	2003	2010

За исследуемый период летние температурные условия в водохранилище наблюдались в 7 случаях уже в третьей декаде мая. При этом максимальная температура воды (19.2°C) отмечалась в 2007 г. Средняя ее величина за первую декаду июня была выше – 21.0–21.5°C в 2 случаях (2013, 2014 гг.), а в 6 – ниже 15°C (11.4°C в 2003 г.).

Наибольший прогрев водохранилища отмечен во второй–третьей декаде июля – 21.9–22.1°C. При этом только в 2-х случаях температура воды была выше в третьей декаде месяца, чем во второй – 23.3°C (2013 г.) и 21.9°C (2015 г.). Средняя температура воды в первой декаде августа в 5 случаях была выше (на 1.5°C в 2018 г.), чем в третьей декаде июля. Следует заметить, что летняя температура воды в водохранилище отмечалась в 11 случаях в первой декаде сентября, и только в 3-х во второй декаде месяца (максимальная 15.9°C в 2009 г.).

Особый интерес при исследовании биологических процессов в водохранилище имеют сведения о средней температуре отдельных сезонов в виде ранжирования выборки [Бойцов, Несветова, 2017 (Boitsov, Nesvetova, 2017)]. Анализ показал, что за время существования водохранилища наблюдалось 9 лет со средней летней температурой воды $\geq 20^\circ\text{C}$ (в современный период 5 лет, максимум 21.9°C в 2010 г.), при этом до потепления (1947–

1976 гг.) только 1 случай – 1954 г., $T = 20.0^\circ\text{C}$. Наибольшая повторяемость (27%) отмечена для диапазона температуры воды 19–20°C.

Сравнение числа случаев со средней температурой воды заданных пределов в июле до и после потепления показало, что если в первый период отмечалась чаще всего температура воды 18–19°C (25%), то во второй – 19–20°C (26%). В современный период не наблюдалась средняя температура воды ниже 18°C (рис. 4).

В летний период существенные различия в прогреве водных масс отмечаются также по наблюдениям на стандартных станциях (рис. 2 б). В аномально теплое лето 2010 г. стратификация водных масс наблюдалась длительное время. В июле средняя температура воды в поверхностном слое составила 27°C, в придонном – 18.5°C. Летние условия 2010 г. характеризуются самыми высокими температурами водной массы в июле–августе за время существования водохранилища. В холодное лето 2017 г. с температурой воздуха на 1–2°C ниже нормы, высокой влажностью (годовой объем притока в водохранилище 52.15 км³), при частых сильных ветрах продолжительное время наблюдалась гомотермия или не превышающая 1–2°C разность температуры по глубине. В июле средняя температура воды составила всего 16.5–18.5°C.

Таблица 5. Средняя температура воды по глубине в летний период 2004–2019 гг.**Table 5.** Average water Temperature at depth in the Summer period 2004–2019

Характеристика / Characteristic	Июнь / June	Июль / July	Август / August
Средняя	16.1	20.0	20.0
Наибольшая (год)	20.1(2006)	22.8(2010)	25.1(2010)
Наименьшая (год)	11.1(2017)	16.0(2017)	17.1(2012)

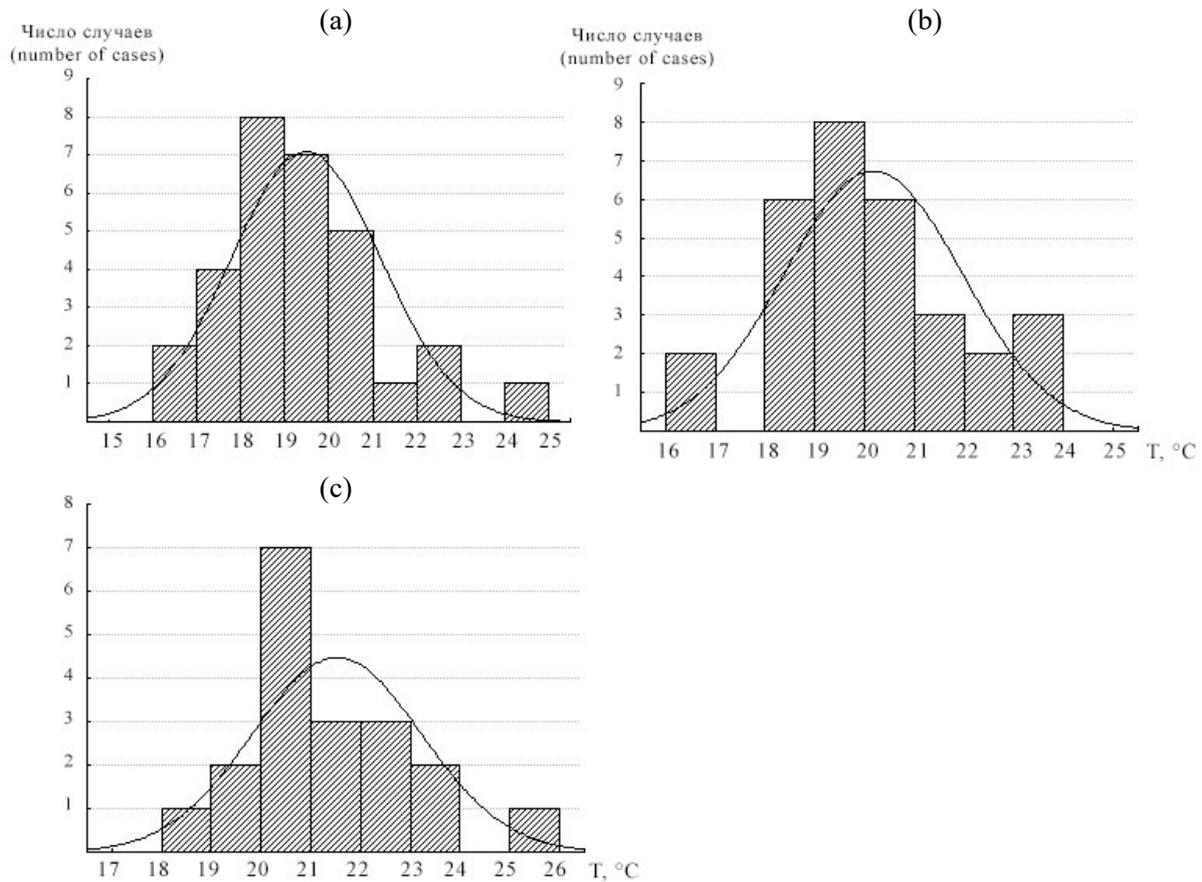


Рис. 4. Число случаев со средней температурой воды в заданных пределах в июле. (а) – 1947–1976 гг., (б) – 1977–2005 гг., (с) – 2006–2019 гг.

Fig. 4. The number of cases with an average water temperature within a given range in July. (a) – 1947–1976, (b) – 1977–2005, (c) – 2006–2019.

За период 2004–2019 гг. средняя температура по глубине, рассчитанная по наблюдениям на 6-ти стандартных станциях, в первой половине лета составила 16°C. В июле–августе она повысилась до 20°C. Максимальная амплитуда, как и для температуры поверхностного слоя воды, отмечена в июне (табл. 5).

С.Н. Тачалов [Тачалов, 1959 (Tachalov, 1959)] исследуя процесс прогрева Рыбинского водохранилища, установил, что за 1947–1958 гг. разность температуры по глубине в отдельных случаях достигала 15.5°C. В работе [Буторин, Курдина, 1982 (Butorin, Kurдина, 1982)] отмечено, что температурное расслоение водной толщи характерно для Главного плеса и наибольшая разность средней температуры на глубине 0.5 м и у дна равна 11.7°C. В современный период произошло уменьшение разности температуры поверхностного и придонного слоев. Максимальная ее величина не превышала 10°C (июль 2010 г.).

Осень. В конце лета общий приход солнечной радиации к поверхности водохранилища на 20–25% ниже, чем в период максимального прогрева [Буторин, Курдина, 1982 (Buto-

gin, Kurдина, 1982)], что приводит к устойчивому уменьшению теплосодержания вод. Температура воздуха становится ниже температуры воды.

Гидрологическая осень характеризуется процессом охлаждения водной массы. Интенсивное охлаждение начинается в первой декаде сентября – температура воды понижается на 2.6°C за декаду, но ее значения еще довольно высоки. Наибольший размах колебаний (6.4°C) отмечен во второй декаде октября (табл. 6). По многолетним данным ее значения становятся ниже 10°C 25 сентября. В современный период эта дата сдвигается на 3 октября. На протяжении всего осеннего периода возможно кратковременное повышение температуры воды.

Для осеннего сезона характерна термическая однородность вод по глубине, которая сохраняется до начала ледостава. В начале сезона при теплой погоде наблюдается кратковременная прямая стратификация с разностью температуры воды на поверхности и у дна 1.5–2.0°C. В отдельные годы довольно высокие ее значения отмечены в октябре – 10–11°C (2010, 2012 гг.), (рис. 3с).

Таблица 6. Характеристики температуры воды Рыбинского водохранилища в осенний период, °С**Table 6.** Characteristics of the water temperature of the Rybinsk Reservoir in the Autumn, °C

Характеристика / Characteristic	Сентябрь / September		Октябрь / October			Ноябрь / November	
	Декада / Dekade						
	2-я	3-я	1-я	2-я	3-я	1-я	2-я
	1961–1990 гг.						
Средняя (норма)	12.7	10.4	7.8	5.8	3.7	1.5	0.8
	2001–2019 гг.						
Средняя	14.1	12.0	9.5	7.1	4.9	3.0	2.2
Максимальная	16.5	15.1	12.2	9.7	6.9	5.5	4.4
Год	2018	2015	2007	2005	2008	2013	2013
Минимальная	11.6	9.4	6.5	3.3	1.4	0.7	0.0
Год	2002	2002	2002	2002	2014	2002	2016

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что в современный период потепления произошло повышение температуры воздуха и воды Рыбинского водохранилища в весенний, летний и осенний сезоны.

В отдельные месяцы вегетационного периода отмечено увеличение амплитуды среднедекадных температур воды, что позволяет оценить роль погодных условий в термике во-

доема. Установлены более ранние сроки наступления летних температур воды, а также увеличение количества лет с аномальными термическими условиями.

Полученные результаты могут быть использованы для расчета теплосодержания водных масс водохранилища, а также для оценки воздействия климатических изменений на экологическое состояние водоема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бойцов В.Д., Несветова Г.И. Условия среды и уловы рыбы в озере Ильмень: изменчивость, сопряженность, прогнозирование. Великий Новгород: ТПК “Печатный Двор”, 2017. 274 с.
- Буторин Н.В., Курдина Т.Н., Бакастов С.С. Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища. Л.: Наука. 1982. 224 с.
- Бюллетень мониторинга климата России. Изменение климата 2019. Весна: март–май // Обзор состояния и тенденций изменения климата России. М. 2019. 25 с.
- Вандюк Н.С. Динаміка температурних характеристик водних мас Канівського водосховища // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2010. Т. 20. С. 83–88.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: Росгидромет, 2019. 97 с.
- Литвинов А.С., Законнова А.В., Поддубный С.А. Климат и гидрологический режим // Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. М.: РАН, 2018. С. 42–48.
- Пуклаков В.В., Гречушникова М.Г. Термический режим московских водохранилищ // Метеорология и гидрология. 2001. № 1. С. 70–79.
- Пырина И.Л., Законнова А.В., Соколова Е.Н. Поступление солнечной радиации и подводный световой режим в Рыбинском водохранилище // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 76–84.
- Тачалов С.Н. Термический режим Рыбинского водохранилища // Сб. работ Рыбинской ГМО. Вып. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1959. С. 106–130.
- Шиловцева О.А., Романенко Ф.А. Многолетние изменения температуры воздуха на Северо-Западном Таймыре и Нижнем Енисее в XX веке // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 55–68.
- Экологический атлас Ярославской области. Ярославль: ООО НПП “Кадастр”, 2015. 154 с.
- Litvinov A.S., Roshchupko V.F. Long-Term Variations of Elements of Hydrometeorological Regime of the Rybinsk Reservoir // Russian Meteorology and Hydrology. 2010. Т. 35. № 7. P. 483–489. DOI: 10.3103/S1068373910070083.
- Litvinov A.S., Zakonnova A.V. Thermal Regime in the Rybinsk Reservoir under Global Warming // Russian Meteorology and Hydrology. 2012. Т. 37. P. 640–644. DOI: 10.3103/S1068373912090087.
- Zakonnova A.V., Litvinov A.S. Analysis of Relation of Water Temperature in the Rybinsk Reservoir with Income of Solar Radiation // Hydrobiological Journal. 2017. Vol. 53. № 6. P. 77–86. DOI: 10.1615/HydrobJ.v53.i6.80.

REFERENCES

- Boytsov V.D., Nesvetova G.I. *Usloviya sredy i ulovy ryby v ozere Il'men': izmenchivost', sopryazhennost', prognozirovaniye* [Conditions of the environment and fish catches in the lake of Ilmen: variability, conjugation, forecasting]. Velikiy Novgorod: TPK “Pechatnyy Dvor”. 2017, 274 p. [In Russian].
- Butorin N.V., Kurдина T.N., Bakastov S.S. *Temperatura vody i gruntov Rybinskogo vodokhranilishcha* [The water and soils Temperature of Rybinsk Reservoir] Leningrad, Nauka, 1982, 224 p. [In Russian].

- Byulleten' monitoringa klimata Rossii. Izmeneniye klimata 2019. Vesna: mart–may [Russian Climate Monitoring Bulletin. Climate change 2019. Spring: March–May]. *Obzor sostoyaniya i ten-dentsiy izmeneniya klimata Rossii*. Moscow, 2019, 25 p.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2019 god* [A Report on Climate features on the Territory of the Russian Federation for 2019]. Moscow, Rosgidromet, 2019, 97 p. [In Russian].
- Ekologicheskiy atlas Yaroslavskoy oblasti* [Environmental Atlas of Yaroslavl region]. Yaroslavl': OOO NPP “Kadastr”, 2015, 154 p.
- Litvinov A.S., Roshchupko V.F. Long-Term Variations of Elements of Gidrometeorological Regime of the Rybinsk Reservoir. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2010, vol. 35, no. 7, pp. 483–489. doi: 10.3103/S1068373910070083.
- Litvinov A.S., Zakonnova A.V. Thermal Regime in the Rybinsk Reservoir under Global Warming. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, vol. 37, pp. 640–644. doi: 10.3103/S1068373912090087.
- Litvinov A.S., Zakonnova A.V., Poddubnyy S.A. Klimat i gidrologicheskiy rezhim [Climate and hydrological Regime]. *Struktura i funktsionirovaniye ekosistemy Rybinskogo vodokhranilishcha v nachale XXI veka*. Moscow, RAN, 2018, pp. 42–48. [In Russian].
- Puklakov V.V., Grechushnikova M.G. Termicheskiy rezhim moskvoretskikh vodokhranilishch [Thermal Regime of Mosvoretzky Reservoirs]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2001, no. 1, pp. 70–79. [In Russian].
- Pyrina I.L., Zakonnova A.V., Sokolova Ye.N. Postupleniye solnechnoy radiatsii i podvodnyy svetovoy rezhim v Rybinskom vodokhranilishche [The Analysis of the Relationship between Water Temperature in the Rybinsk Reservoir and the Solar Radiation Influx]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2018, no. 1, pp. 76–84. [In Russian].
- Shilovtseva O.A., Romanenko F.A. Mnogoletniye izmeneniya temperatury vozdukha na Severo-Zapadnom Taymyre i Nizhnem Yeniseye v XX veke [Long-Term changes in air Temperature in the North-Western Taimyr and Lower Yenisei in the XX century]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2005, no. 3, pp. 55–68. [In Russian].
- Tachalov S.N. Termicheskiy rezhim Rybinskogo vodokhranilishcha [Thermal Regime in the Rybinsk Reservoir]. *Sb. rabot Rybinskoy GMO*, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1959, vol. 1, pp. 106–130. [In Russian].
- Vandyuk N.S. Dinamika temperaturnykh karakteristik vodnykh mass Kanivskogo vodokhranilishcha [Dynamics of the Temperature characteristics of the water Masses of Kaniv Reservoir]. *Gidrologiya, gidrokhimiya, gidroekologiya*, 2010, vol. 20, pp. 83–88.
- Zakonnova A.V., Litvinov A.S. Analysis of Relation of Water Temperature in the Rybinsk Reservoir with Income of Solar Radiation. *Hydrobiological Journal*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 77–86. doi: 10.1615/HydrobJ.v53.i6.80.

THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE THERMAL REGIME IN THE RYBINSK RESERVOIR

A. V. Zakonnova

*Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences,
152742 Russia, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, e-mail: zak@ibiw.ru*

According to the data of the Rybinsk Hydrometeorological Observatory (HMO) and archival data of the Laboratory of Hydrology, Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, the seasonal variability of the main climate parameters, air temperature (Rybinsk HMO) and water temperature in the Rybinsk Reservoir have been studied at the modern stage of global warming (2001–2019). Over the period of 1976–2019, the rate of an increase in the average annual air temperature was 0.50°C /10 years in the littoral zone of the Rybinsk Reservoir. Changes in the timing of the onset and end of the climatic seasons of the year and an increase in their duration have been determined. It is found that during the modern period the average surface air temperature was higher than the climatic norm in all months of the year (1960–1990). During the growing season (conventionally May–October), its maximum increase was recorded in July, 1.5°C, May and September, 1.2°C. It is shown during the modern period of intensive global warming the average decadal water temperature in the spring, summer, and autumn seasons increased compared to the norm. The maximum positive anomalies were recorded in the second-third decade of May, 2.8–2.3°C and July, 2.0°C. According to observations at the standard stations, significant differences were recorded in water mass heating: in July in anomalously warm summer of 2010 the average water temperature was 27°C in the surface layer and 18.5°C in the near bottom layer; in the cold summer of 2017, the temperature was 18.5 and 16.0°C, respectively. The monitoring data on the water temperature in the reservoir indicate an increase in the number of years with anomalous thermal conditions as a result of climate change. The earlier temperature stratification of water masses (the end of May) and decrease in the difference in the temperature between the surface and near-bottom water layers have been observed.

Keywords: global warming, Rybinsk Reservoir, air temperature, water temperature, seasonal dynamics