

ОСОБЕННОСТИ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ ОЗЕР БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

А. А. Волчек¹, И. И. Кирвель², З. Михальчык³, А. Хойнский⁴

¹Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, Volchak@tut.by

²Академия Поморска, Слупск, Польша, kirviel@yandex.by

³Университет М. Кюри-Складовской, Люблин, Польша, zdzislaw.michalczyk@poczta.umcs.lublin.pl

⁴Университет им. А. Мицкевича, Познань, Польша, choinski@amu.edu.pl

Введение. Озера являются уникальными водными объектами и имеют важное экономическое и экологическое значение. В Белорусском Полесье насчитывается около 5 тыс. озер. В связи с тем, что водообмен в озерах замедлен, они являются более уязвимыми по сравнению с реками, могут служить чувствительным индикатором изменений большинства климатических факторов. Температура воды является одним из главных индикаторов, способных уже на ранних стадиях указать на характер и интенсивность изменения протекающих в озерных экосистемах гидрологических и биологических процессов.

Реакции термического режима озер на региональные изменения климата, связанные с глобальным потеплением, наблюдаются как в малых, так и в крупнейших озерах мира. Например, в Северной Америке в крупнейшем из Великих озер – оз. Верхнем летняя температура поверхности воды (июль – сентябрь) за последние 100 лет увеличилась на 3,5 °С, с самым значительным потеплением в последние три десятилетия. В 1979–2006 гг. средняя скорость повышения температуры поверхности воды в этом озере составила 1,1 °С/10 лет. В озерах Мичиган и Гурон температура поверхности воды в этот период увеличивалась на 0,65 °С/10 лет и 0,86 °С/10 лет соответственно. Тренды повышения температуры поверхностного слоя воды характерны и для озер Европы. В оз. Женева температура воды в эпилимнионе с 1983 по 2000 г. увеличивалась на 0,59 °С/10 лет. Исследования в малом оз. Плюссзее на севере Германии за 1969–2006 гг. показали тренды потепления в эпилимнионе на 0,6–0,8 °С/10 лет [7]. На территории России в оз. Байкал, по данным гидрологического поста Листвянка, за 1896–2005 гг. происходил рост средней (май – сентябрь) температуры поверхности воды с трендом 0,85 °С/10 лет и с фазой значительного роста в 1970–1995 гг. на 0,54 °С/10 лет [7]. На оз. Байкал за 1945–2005 гг. температура воды в эпилимнионе увеличивалась на 0,2 °С/10 лет. Для Рыбинского водохранилища установлена тенденция к повышению средней температуры поверхностного слоя воды в период 1976–2008 гг. во все месяцы при максимальной скорости роста в июле 0,89 °С/10 лет [7].

Исследованию изменений гидрологического и термического режимов озер Беларуси посвящено ряд работ [1–4, 9, 10]. В последнее время природно-климатические факторы и антропогенные воздействия вызвали изменения температурного режима озер Беларуси и в ряде случаев существенные. Поэтому появилась необходимость экологического прогноза в условиях изменяющегося климата и антропогенных воздействий на водные объекты, которая ставит перед исследователями ряд конкретных задач по изучению эволюции озерных экосистем, разработке количественных, качественных диагностических, имитационных и прогностических моделей.

Существенной трудностью при моделировании температурного режима озер во времени является недостаток данных для ретроспективного анализа их эволюции. Кроме того, проблема усугубляется возрастающим антропогенным влиянием на водные экосистемы, сложностью выделения природных и антропогенных составляющих в наблюдаемых процессах. Индивидуальность в формировании температурного режима озер требует в каждом конкретном случае отдельного рассмотрения. Однако создание математических моделей, отражающих объективные закономерности развития температурных изменений во времени, и построение прогнозов представляет значительный научный и практический интерес и разрабатывается в самых различных направлениях.

Целью настоящей работы является анализ временных рядов температуры воды озер Белорусского Полесья для выявления закономерностей в их колебании, количественной оценки изменений температурного режима озерных экосистем.

Исходные материалы и методы исследования. Материалом для исследования послужили данные многолетних инструментальных наблюдений Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды за температурами воды на 2 крупнейших озерах Белорусского Полесья. Ниже даны основные количественные характеристики (табл. 1) и краткое описание озер [11].

Озеро *Выгонощанское* – это мелководный водоём типа озера-разлива. Котловина остаточного происхождения овальной формы имеет простые и плавные очертания, нарушаемые на северо-западном побережье узким заливом глубиной 1 м. Длина береговой линии 21 км. На всём протяжении берега низкие, торфянистые и труднодоступные. Большой водосбор озера – 61,1 км² представляет собой плоскую, низменную заболоченную равнину. Хорошо проточно. Особенности гидрологического режима складываются под воздействием искусственного регулирования уровня с помощью плотины на Огинском канале. Подводная часть котловины имеет блюдцеобразную форму. На большей его части преобладают глубины 1,0–1,5 м, на западе и юго-западе много отмелей. Наибольшая глубина находится в восточной части озера и составляет 2,3 м, при средней – 1,2 м. Литоральная полоса отсутствует. В безледный период вода в озере полностью прогревается. Около 80 % ложа покрыто водной растительностью.

Озеро *Червоное* является мелководным водоемом. Плоская овальная котловина остаточного типа с ровным характером дна и небольшими желобообразными углублениями. Слабопроточное, принадлежит к системе реки Припяти. Питается в основном болотными водами. Небольшая глубина и открытая котловина способствуют равномерному распределению температуры в водной толще, вызывая гомотермию. Сильное ветровое перемешивание благоприятствует прогреванию воды.

Таблица 1. Основные характеристики озер

Озеро	Проточность	Генетический тип	Площадь, км ²		Глубина, м		Объем, млн ³
			зеркала	водосбора	средняя	максим.	
Выгонощанское	Проточное	Эвтрофное	26,0	61,1	1,2	2,3	32,1
Червоное	Слабопроточное	Дистрофирующее	40,82	187,3	0,7	2,9	27,35

Расчётный интервал по исследуемым водоёмам принят дифференцированным: с мая по октябрь принята месячная дискретность; для апреля и ноября – декадная дискретность, чтобы более полно отразить температурные особенности, поскольку весной идет нагревание водной толщи, преимущественно в апреле, а охлаждение в ноябре. Отдельно рассматривались максимальные температуры воды. Кроме того, выполнен анализ изменения дат устойчивого перехода срочных значений температуры воды через 0,2, 4 и 10 °С весной и осенью. За дату устойчивого перехода принимается день, начиная с которого температура воды во все сроки измерений будет выше (ниже) заданных пределов в течение периода не меньше 20 дней. Весной переход температуры воды через 0,2 °С в сторону повышения (понижения) происходят спустя 10–15 дней после перехода температуры воздуха через 0 °С. После этого перехода начинает интенсивное таяние (образование) ледового покрова. При температуре 4 °С вода достигает своей максимальной плотности и температура одинакова по всей глубине (во всей водной толще). После перехода воды через 10 °С начинается ускоренный процесс фотосинтеза, идёт активное развитие (отмирание) высшей водной растительности. При переходе температуры озёрной воды через 10 °С происходит летнее нагревание (осеннее охлаждение) водоёма [5, 6].

Факторы, влияющие на формирование температурного режима воды озер, можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся глобальные факторы, которые касаются больших территорий, а ко второй – локальные факторы. Тогда температура воды в озере можно представить как:

$$t(\tau) = t_{\phi}(\tau) \pm \Delta t_{\lambda}(\tau), \quad (1)$$

где $t(\tau)$ – температура воды в озере в расчетном календарном году, °С; $t_{\phi}(\tau)$ – фоновая составляющая в формировании температурного режима озера в том же году, °С; $\pm \Delta t_{\lambda}(\tau)$ – вклад в формирование температурного режима озера локальных факторов, °С.

Влияние глобальных факторов на формирование температурного режима озера, с достаточной для практических расчетов точностью, можно описать с помощью линейнополиномиальных второй степени трендов:

$$t_{\phi}(\tau) = t_{\phi}(0) \pm \Delta t \cdot \tau; \quad (2)$$

$$t_{\phi}(\tau) = \alpha \cdot \tau^2 + \beta \cdot \tau + \gamma; \quad (3)$$

где $t_{\phi}(0)$ – температура воды в озере на начало расчетного периода, °С; Δt – скорость изменения температуры воды, °С/год; α, β, γ – эмпирические коэффициенты; τ – календарный год.

При статистическом анализе временных рядов использованы следующие методики:

– для выявления тенденций изменений использовались хронологические графики колебаний и разностные интегральные кривые;

– для оценки различий в статистических параметрах использовался критерий Стьюдента и критерий Фишера.

Анализ результатов исследований. На первом этапе исследований временных рядов температуры воды определены их основные статистические параметры (средняя температура (t_{cp} , °С), максимальная (t_{max} , °С) и минимальная (t_{min} , °С) температура за период наблюдения, коэффициенты вариации (Cv) и асимметрии (Cs), а также скорость изменения температуры воды (Δt), °С/10 лет, значение коэффициента корреляции линейных трендов (r)), которые приведены в табл. 2.

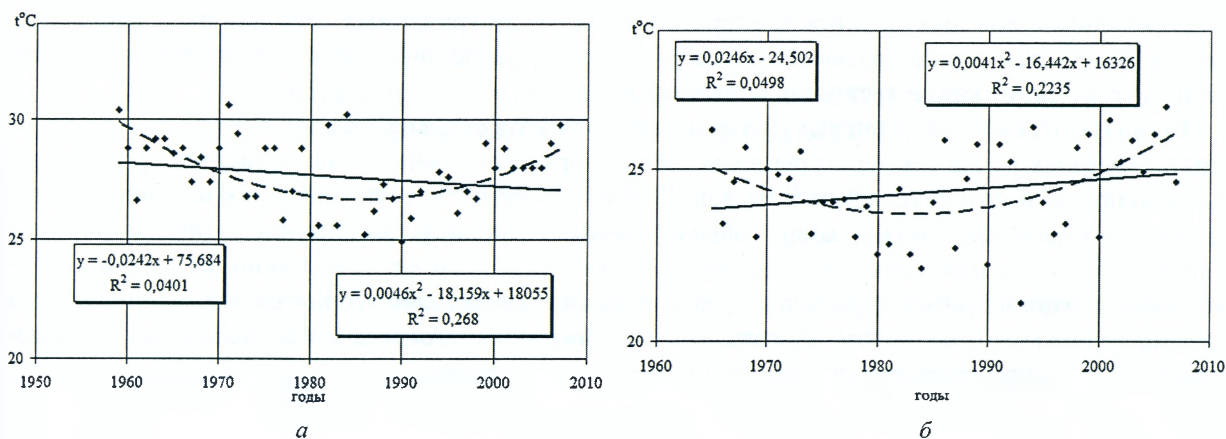
Таблица 2. Основные статистические параметры температуры воды озер

Параметр	Интервал осреднения												
	апрель			май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь			макс.
Декада	I	II	III							I	II	III	
Выгоношанское (период наблюдений 1965–2007 гг.)													
t_{cp} , °С	4,9	7,3	10,3	14,8	18,1	19,5	18,4	13,2	7,4	3,7	2,3	1,5	24,4
t_{max} , °С	9,1	12,4	18,0	18,0	22,0	23,1	20,4	18,5	9,8	9,7	7,0	5,7	26,8
t_{min} , °С	0,0	1,1	5,0	10,5	14,4	16,1	16,3	10,5	4,3	0,0	0,0	0,0	21,1
Cv	0,49	0,33	0,27	0,12	0,08	0,09	0,06	0,12	0,18	0,57	0,77	1,06	0,06
Cs	-0,63	-0,02	0,55	-0,13	0,26	0,28	-0,10	0,73	-0,21	0,58	0,75	0,99	-0,27
$\Delta t/10\text{лет}$, °С	0,31	0,49	0,56	0,04	0,09	0,47	0,38	0,30	0,31	-0,11	-0,11	0,21	0,24
r	0,24	0,23	0,30	0,10	0,22	0,25	0,49	0,33	0,15	0,01	-0,22	0,05	0,16
Червоное (период наблюдений 1959–2007 гг.)													
t_{cp} , °С	4,5	7,4	10,9	15,7	20,1	21,7	20,4	14,6	8,2	3,8	2,6	1,6	27,6
t_{max} , °С	9,4	13,8	16,4	20,2	24,1	26,3	24,7	18,8	13,1	10,3	9,9	8,1	30,6
t_{min} , °С	0,0	1,1	3,9	10,7	14,4	16,5	17,2	9,8	4,5	0,0	0,0	0,0	22,6
Cv	0,56	0,37	0,27	0,15	0,12	0,10	0,09	0,11	0,26	0,65	0,85	1,25	0,06
Cs	-0,45	-0,16	-0,20	-0,32	-0,18	-0,01	0,53	-0,37	0,49	0,61	0,98	1,59	-0,66
$\Delta t/10\text{лет}$, °С	0,36	0,17	0,33	0,28	0,44	0,76	0,78	0,38	0,36	-0,32	-0,05	0,14	-0,24
r	0,07	0,09	0,18	0,22	0,30	0,49	0,57	0,36	0,34	-0,10	0,01	0,09	-0,20

Примечание. Выделены величины статистически значимых коэффициентов корреляции.

Временной ход колебаний температуры воды озер отслеживался с помощью хронологических графиков. Анализ колебаний температуры воды озер за рассматриваемые интервалы свидетельствует о наличии в многолетнем ходе этих значений статистически значимых на 95%-ном уровне трендов увеличения температуры воды. Наиболее выражен рост температуры воды наблюдается в оз. Выгоношанском в августе и сентябре, оз. Червоное – июль, август, сентябрь и октябрь. Максимальный рост температуры воды наблюдается в июле и августе в оз. Червоном и превышает 0,7 °С в 10 лет. Отрицательных статистически значимых градиентов температуры воды, как правило, не наблюдается, за исключением отдельных декад ноября, где уменьшение температуры воды составляет 0,2–0,3 °С в 10 лет.

На рис. приведен хронологический ход максимальных температур воды, а также линейные и полиномиальные второй степени тренды температуры воды рассматриваемых озер. Как видно



Хронологический ход максимальных температур воды озер Беларуси: а – Выгонощанское; б – Червоное

из рис., динамика температуры воды в озерах носит сложный и неоднозначный характер. На озерах Белорусского Полесья статистического значимого роста максимальных температур воды не наблюдается, хотя тенденции к росту имеют место. При этом скорости этих процессов существенно разнятся по территории. Это связано с особенностями температурной и ветровой структуры сформировавшийся на территории Полесья в современных условиях [6, 8].

Эмпирические кривые обеспеченности для временных рядов температуры воды озер для всех периодов соответствуют распределению Пирсона III типа при различных сочетаниях $C_s = (1-3)C_v$. Поскольку функция распределения вероятностей температуры воды озер при таких оценках параметров незначительно отличается от функции нормального распределения, применение параметрических критериев для проверки статистических гипотез можно считать допустимым.

Анализ однородности временных рядов температуры воды озер. Рассматривалась устойчивость выборочных статистик (средних и коэффициентов вариации) при изменении периодов осреднения применительно к температуре воды озер за период инструментальных наблюдений. При этом исследуемый временной ряд разбивался на два периода: с начала наблюдений по 1986 г. включительно и с 1987 г. (начало роста среднегодовых температур воздуха) по 2007 г. Для оценки различий в режиме температуры воды озер использованы статистические критерии Стьюдента (оценка выборочных средних) и Фишера (оценка выборочных дисперсий). В табл. 3 приведены основные статистические параметры для этих интервалов, а также результаты статистической проверки на однородность.

Таблица 3. Основные статистические параметры временных рядов температуры воды озер для различных интервалов осреднения

Параметр	Интервал осреднения												
	апрель			май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь			макс.
	I	II	III							I	II	III	
Выгонощанское (период наблюдений 1965–1986 гг.)													
$t_{cp}, ^\circ C$	4,6	6,7	9,9	14,7	17,9	18,9	18,0	12,8	7,1	3,8	2,3	1,3	24,0
C_v	0,53	0,34	0,28	0,12	0,08	0,08	0,06	0,11	0,19	0,53	0,76	1,01	0,05
Выгонощанское (период наблюдений 1987–2007 гг.)													
$t_{cp}, ^\circ C$	5,3	8,0	10,8	14,9	18,3	20,2	18,8	13,7	7,8	3,6	2,3	1,6	24,7
C_v	0,46	0,31	0,26	0,11	0,07	0,09	0,06	0,13	0,16	0,62	0,79	1,09	0,06
Червоное (период наблюдений 1959–1986 гг.)													
$t_{cp}, ^\circ C$	4,2	6,9	10,1	15,3	19,5	20,6	19,4	14,1	7,5	4,0	2,4	1,5	27,8
C_v	0,67	0,43	0,28	0,15	0,11	0,08	0,06	0,11	0,23	0,57	0,80	1,21	0,07
Червоное (период наблюдений 1987–2007 гг.)													
$t_{cp}, ^\circ C$	4,8	8,1	12,1	16,3	20,9	23,2	21,6	15,3	9,1	3,4	2,8	1,9	27,3
C_v	0,44	0,29	0,24	0,14	0,11	0,09	0,08	0,11	0,25	0,77	0,93	1,33	0,05

В результате анализа средних температур воды рассматриваемых озер для выделенных периодов было установлено повсеместное ее увеличение, особенно весной. В тоже время коэффициенты корреляции существенно не изменились.

Выводы. Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик временных рядов температуры воды озер Белорусского Полесья за период инструментальных наблюдений позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике температуры воды озер, обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла. При анализе закономерностей многолетних колебаний температуры воды озер использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса рассматриваемого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических.

Литература

1. Kirvel I. Modeling of the trajectory of the level fluctuations in Lake Naroch / I. Kirvel, A. Volchak, S. Parfomuk // *Quaestiones Geographicae* 35(1), Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe, 2016. – Pp. 61–66.
2. Volchak A Lake water level variations in Belarus / A. Volchak, I. Kirvel // *Limnological Review* (2013) 13, 2. – P. 115–126.
3. Волчек А. А. Прогнозирование колебаний испарения с водной поверхности водоемов Беларуси / А. А. Волчек, П. И. Кирвель // *Вестн. БГУ. Сер. 2.* 2008. № 2. – С. 86–93.
4. Волчек А. А. Пространственно-временные колебания уровней воды озер Беларуси в условиях изменяющегося климата / А. А. Волчек // *Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплотехника.* 2008. №2(50). – С. 27–37.
5. Волчек А. А. Колебания составляющих водного баланса озер Беларуси в современных климатических условиях / А. А. Волчек, И. И. Кирвель, П. И. Кирвель // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 34.* Научно-теоретический журнал. Специальный выпуск. – СПб.: РГТМУ, 2014. – С. 33–42.
6. Волчек А. А. Пространственно-временные колебания температуры воды озер Беларуси в условиях изменяющегося климата / А. А. Волчек, П. И. Кирвель, В. И. Мельник // *Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплотехника.* 2009. №2(56). – С. 28–34.
7. Ефремова Т. В. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) / Т. В. Ефремова, Н. И. Пальшин, Б. З. Белашев // *Водные ресурсы.* 2016. Т. 43, № 2. – С. 228–238.
8. Логинов В. Ф. Изменение ветрового режима на территории Беларуси в XX в. / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Г. В. Волобуева // *Природные ресурсы.* 2005. № 4. – С. 5–12.
9. Логинов В. Ф. Изменение испарения с водной поверхности на территории Белоруссии / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек // *География и природные ресурсы.* № 2. 2005. – С. 137–144.
10. Моделирование траектории колебаний уровня озера Нарочь / А. А. Волчек, М. Г. Герменчук, И. И. Кирвель, С. И. Парфомук, Л. Н. Журавович // *Экологический вестник.* 2015. №3(33). – С. 30–36.
11. Якушко О. Ф. Озёра Белоруссии / О. Ф. Якушко. – Минск: Урожай, 1988. – 216 с.

SPECIFICS OF WATER TEMPERATURE OSCILLATIONS OF BELARUSSIAN POLESIA LAKES UNDER CHANGING CLIMATE CONDITIONS

A. A. Volchek¹, I. I. Kirvel², Z. Mihalchyk³, A. Hoinsky⁴

¹*Brest State Technical University, Brest, Belarus*

²*Akademia Pomorska, Slupsk, Poland*

³*University of Maria Curie-Skłodowska, Lublin, Poland*

⁴*University named after Adam Mickiewicz, Poznan, Poland*

Results of the oscillations analysis of the Belarussian Polesia lakes temperature regime are presented. Data of long-term instrumental observations of the water temperature for two unique Belarussian Polesia lakes are used, that is Vygonoshanskoe and Chervonoe. Differentiated computational interval is accepted, with monthly discretisation from May to October and decade discretisation for April and November. Maximum water temperature was reviewed separately.

Water temperature dynamics in lakes has complex and ambiguous nature. Water temperature shows most clear growth in August and September at Vygonoshanskoe and in July, August, September and October at Chervonoe. Maximum water temperature growth is observed in July and August at Chervonoe, and it is higher than 0,7 °C in 10 years. Statistically-significant growth of maximum water temperatures is not observed, but growth tendencies are present. Speed of these processes is substantially different per territory. It is caused by specifics of temperature and wind structure, formed on the Polesie territory in contemporary conditions.