

Нина Ю. Суховило

Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, ул. Ленинградская 16,  
220030 Минск, Беларусь; e-mail: SukhoviloNY@bsu.by

## Влияние метеорологических и климатических условий на термодинамические процессы в разнотипных озерах Беларуси

Suchowiło N. Ju. **Wpływ warunków meteorologicznych i klimatycznych na procesy termodynamiczne w różnych typach jezior Białorusi.** Przedstawiono przegląd zagadnień dotyczących zmian reżimu termicznego jezior strefy umiarkowanej półkuli północnej. Stwierdzono związek między warunkami meteorologicznymi na obszarze Białorusi i procesami termodynamicznymi zachodzącymi w różnych typach jezior. Omówiono zagadnienie wpływu temperatury powietrza i prędkości wiatru na zasoby ciepła w masie wodnej oraz strukturę termiczną jezior. Przedstawiono analizę wieloletniej dynamiki zasobów ciepła i stabilności termicznej. Wskazano na tendencję do wzrostu stabilności termicznej i zasobów ciepłych badanych zbiorników, szczególnie widoczną w okresie dwóch ostatnich dziesięcioleci. W przypadku jezior głębokich wpłynęło to na zwiększenie stratyfikacji termicznej i pogorszenie reżimu gazowego w przydennych warstwach wody w okresie letnim. Znaczący wzrost stabilności termicznej może spowodować przejście jezior o średniej głębokości ze stanu polimiktycznego do dimiktycznego, i – w związku z tym – obniżenie koncentracji tlenu przy dnie.

Sukhovilo N. Yu. **Influence of meteorological and climatic conditions on thermodynamic processes in different types of Belarusian lakes.** The article provides an overview of the problem of changing the thermal regime of the lakes of the temperate zone of the northern hemisphere. Interrelations between meteorological conditions on the territory of Belarus and thermodynamic processes in different types of lakes are revealed. The issues of the influence of air temperature and wind speed on the heat storage of the water mass and the thermal structure of water bodies in Belarus are considered. An analysis of the long-term dynamics of heat storage and thermal stability is given. The tendency to an increase in thermal stability and heat storage of the studied water bodies, which has been particularly pronounced in the last two decades, is shown. In deep lakes, this contributed to the enhancement of thermal stratification and the deterioration of the gas regime in the bottom layers during the summer period. A more significant increase in thermal stability may result in the transition of mid-deep lakes from a polymictic state to a dimictic one, and, as a result, a decrease in the oxygen concentration in hypolimnion.

**Ключевые слова:** озеро, теплозапас, термическая устойчивость, стратификация, перемешивание, температура воды, температура воздуха

**Słowa kluczowe:** jezioro, zasoby ciepła, stabilność termiczna, stratyfikacja, mieszanie, temperatura wody, temperatura powietrza

**Key words:** lake, heat storage, thermal stability, stratification, mixing, water temperature, air temperature

### Аннотация

В статье дан обзор проблемы изменения термического режима озер умеренного пояса северного полушария. Выявлены взаимосвязи между метеорологическими условиями на территории Беларуси и термодинамическими процессами в разнотипных озерах. Рассмотрены вопросы влияния температуры воздуха и скорости ветра на

теплосодержание водной массы и термическую структуру водоемов Беларуси. Дан анализ многолетней динамики теплозапасов и термической устойчивости. Показана тенденция к росту термической устойчивости и теплосодержания исследованных водоемов, особенно ярко проявившаяся в последние два десятилетия. В глубоких озерах это поспособствовало усилению термической стратификации и ухудшению газового

режима в придонных слоях в летний период. Более значительный рост термической устойчивости может повлечь за собой переход среднеглубоких озер из полимиктического состояния к димиктическому, и, как следствие, снижение концентрации кислорода у дна.

## Введение

Термический режим озер в значительной мере влияет на развитие физических, химических и биологических процессов, что, определяет их трофический статус. В свою очередь, пространственно-временная изменчивость распределения термо- и гидродинамических характеристик в озерах зависит одновременно от зональных климатических особенностей региона, определяющих поступление солнечной радиации, и от морфометрии котловин, влияющей на процессы перемешивания и перераспределения тепла в водной толще. Поэтому актуальной проблемой лимнологии является выявление генетически обусловленных связей и закономерностей, определяющих развитие разнотипных водоемов, что обусловлено необходимостью охраны водных, биологических и рекреационных ресурсов озер и эффективного управления ими.

Основы изучения термодинамики озерных водоемов были заложены Ф. Форелем и Э. Берджем (BIRGE, 1916). Дальнейшие исследования в этой сфере проводили Э. Горхам, В. Амброзетти, Д. Имбоден и др. (GORHAM, 1964; IMBODEN, WÜEST, 1995; AMBROSETTI, BARVANTI, 2002a, б). Общие направления динамики состояния водоемов и географические особенности процессов, протекающих в них при изменении климата, описаны в работах: ADRIAN et al. (2009), WILLIAMSON et al. (2009), GEORGE (2010), DOKULIL (2013), WEINBERGER, VETTER (2014), BUTCHER et al. (2015). Средняя температура водной поверхности озер Швейцарии увеличивается на  $0,29^{\circ}\text{C}$  за десятилетие, Великобритании – на  $0,35^{\circ}\text{C}$ , Финляндии – на  $0,39^{\circ}\text{C}$ , Австрии – на  $0,43^{\circ}\text{C}$ . Более подробно описаны изменения термического режима озер Австрии. Температура воды в озерах Литвы за безледоставный период с 1981 до 2000 г. выросла в среднем на  $0,1\text{--}1,1^{\circ}\text{C}$ . В октябре в не-

которых озерах, наоборот, наблюдается снижение средней температуры. Зимние температуры воды также увеличиваются. Средняя скорость роста зимней поверхностной температуры изменяется от  $0,014^{\circ}\text{C}/\text{год}$  в Австрии до  $0,026^{\circ}\text{C}/\text{год}$  в Великобритании, а придонная температура воды – от  $< 0,010^{\circ}\text{C}/\text{год}$  в Финляндии до  $0,034^{\circ}\text{C}/\text{год}$  в Великобритании. Статистически значимые тренды обеих температур были выявлены только в двух озерах, расположенных в Великобритании и Швейцарии (DOKULIL, 2013).

Трансформация теплового режима происходит также в крупных озерах Европы, Азии и Северной Америки. Например, температура воды в Онежском озере в течение 2000–2009 гг. превышала среднее многолетнее значение, равное  $4,3^{\circ}\text{C}$ , на  $0,3\text{--}0,7^{\circ}\text{C}$ , в Ладожском озере наблюдается слабая тенденция к увеличению температуры на  $0,05\text{--}0,07^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , но этот рост отмечается лишь для небольших промежутков времени, сопоставимых по продолжительности с естественным синоптическим периодом (ЕФРЕМОВА, ПАЛЬШИН, БЕЛАШЕВ, 2016). Температура поверхностных слоев воды северной части озера Байкал с 1970 г. до середины 1990-х гг. увеличивалась на  $0,54\text{--}0,60^{\circ}\text{C}$  за десятилетие, в то время как пункты наблюдений, расположенные в южной части озера, фиксировали рост на уровне  $0,25\text{--}0,35^{\circ}\text{C}$  за десятилетие, а максимальные темпы роста средней температуры наблюдаются в июле и августе, т.е. в период максимального прогрева.

В водоемах умеренного пояса Северной Америки также наблюдается тенденция к росту температуры воды. В оз. Верхнем летняя температура поверхности воды (июль – сентябрь) за последние 100 лет увеличилась на  $3,5^{\circ}\text{C}$ , с самым значительным потеплением в последние три десятилетия. В 1979–2006 гг. средняя скорость повышения температуры поверхности воды в нем составляла  $1,1^{\circ}\text{C}/10$  лет. В озерах Мичиган и Гурон температура поверхности воды в этот период увеличивалась на  $0,65^{\circ}\text{C}/10$  лет и  $0,86^{\circ}\text{C}/10$  лет соответственно (AUSTIN, DOLMAN, 2008; DOBIESZ, LESTER, 2009).

В 2003–2005 гг. в Европе был реализован проект CLIME (Climate and Lake Impacts in Europe), цель которого заключалась в оценке пря-

мых и косвенных последствий регионального изменения климата для озерных экосистем Европы. Эта оценка опиралась с одной стороны на развитие набора моделей для имитации реакции озер на прогнозируемое изменение климата, а с другой стороны, на анализ исторических закономерностей изменения в озерах, расположенных в трех регионах Европы: северном (Эстония, Финляндия, Швеция), западном (Ирландия, Великобритания) и центральном (Австрия, Германия, Швейцария) (GEORGE, 2010). С момента реализации проекта были внесены корректировки в сценарии изменения климата, соответственно, оценки их последствий также постоянно совершенствуются.

Исследованию влияния климатических условий на водные ресурсы Беларуси посвящены работы В. Ф. Логинова, А. А. Волчека, И. И. Кирвеля, Б. П. Власова, П. И. Кирвеля и др. (ВЕЖНОВЕЦ, 1984; ВЛАСОВ и др., 2004; КИРВЕЛЬ, 2010; *Шестое Национальное...*, 2014; ВОЛЧЕК, 2016; СУХОВИЛО, 2017a, b). Ими отмечены тенденции роста температур воды, схожие по темпам с аналогичными показателями в других европейских регионах. Однако в связи с климатическими изменениями последних десятилетий произошло повышение температуры воды, что повлекло за собой изменение вертикальной термической структуры водоемов, гидрохимического режима и условий обитания гидробионтов. По данным Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, ее рост на территории Беларуси в период 1989–2015 гг. составил 1,3°C (*Климат Республики Беларусь в 2015 году*).

Цель исследования заключалась в выявлении взаимосвязей между метеорологическими условиями на территории Беларуси и термодинамическими процессами в разнотипных озерах.

## Материалы и методы

В качестве объектов исследования было выбрано 11 озер, расположенных на территории Поозерской и Полесской физико-географи-

ческих провинций. Это озера: Нарочь, Лукомское, Дривяты, Волосо Южный, Нещердо, Мясстро, Мядель, Лепельское, Отолово, Выгонощанское, Червоное. Их выбор обусловлен наличием данных наблюдений за температурой воды за многолетний период, а также необходимостью охвата водоемов с различной морфометрией и трофическим статусом. Все озера различаются по генезису котловин, морфометрическим параметрам и обладают различным трофическим статусом: озеро Волосо Южный является мезотрофным с признаками олиготрофии, Нарочь и Мядель – мезотрофными, остальные водоемы – эвтрофными. Площади водоемов варьируются от 1,2 (озеро Волосо Южный) до 79,6 км<sup>2</sup> (озеро Нарочь), максимальные глубины – от 2–3 (озера Выгонощанское и Червоное на Полесье) до 40,4 м (озеро Волосо Южный). Озера Мядель, Лепельское, Волосо Южный, северная часть озера Отолово являются димиктическими, остальные водоемы – полимиктическими. Большинство озер характеризуется естественным термическим режимом, только озеро Лукомское является водоемом-охладителем Лукомльской ГРЭС, и поэтому подвержено тепловому загрязнению. Схема расположения исследуемых водоемов приведена на рис. 1. Основные морфометрические характеристики, трофический статус и площади водосборов озер приведены в табл. 1.

Исходными данными послужили материалы комплексного обследования озер Беларуси, проведенного НИЛ озероведения БГУ, фондовые данные Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (*Государственный водный кадастр...*, 1965–2018; *rp5.by*), данные измерений температуры воды, выполненные сотрудниками НПЦ по биоресурсам НАН Беларуси, а также материалы собственных полевых исследований автора, позволившие актуализировать базу данных и исследовать процессы, протекающие в водоемах в период климатических изменений.

Периоды наблюдений за температурой воды на озерах различны. Наиболее длительный ряд данных характерен для озера Нарочь,

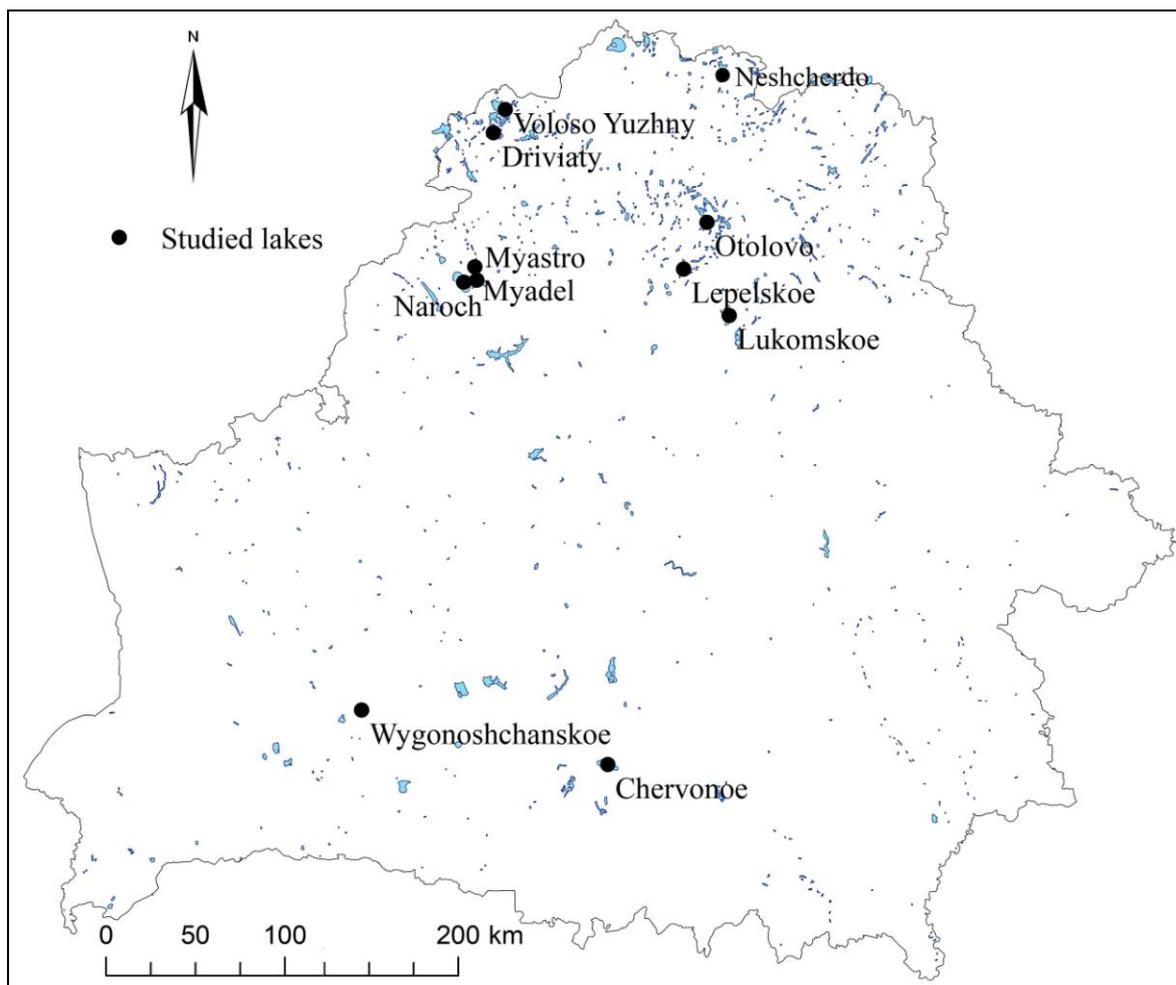


Рис. 1. Схема расположения исследованных озер

Rys. 1. Położenie badanych jezior

Fig. 1. The layout of the investigated lakes

Таблица 1. Основные морфометрические характеристики, трофический статус и площади водосборов исследованных озер

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki morfometryczne, status troficzny i powierzchnie zlewni badanych jezior

Table 1. Main morphometric characteristics, trophic status and catchment areas of the studied lakes

Озеро	Площадь, км <sup>2</sup>	Объём, млн м <sup>3</sup>	Максимальная глубина, м	Прозрачность, м	Трофический статус	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>
Волосо Южный	1,21	15,07	40,40	11,0	Мезотрофное с признаками олиготрофии	6,0
Выгонощанское	26,00	32,10	2,30	0,5	Высокоэвтрофное	61,1
Дривяты	36,14	223,52	12,00	2,4	Эвтрофное	423,0
Лепельское	10,18	74,67	33,70	2,0	Эвтрофное	1 279,6
Лукомское	37,71	249,00	11,50	2,0	Эвтрофное	179,0
Мядель	16,20	102,00	24,60	5,5	Мезотрофное	89,9
Мястро	13,10	70,10	11,30	2,8	Эвтрофное	120,0
Нарочь	79,62	710,40	24,80	7,0	Мезотрофное	279,0
Нешердо	24,62	84,72	8,10	1,0	Высокоэвтрофное	143,0
Околово	8,20	27,86	16,40	2,0	Эвтрофное	318,0
Червоное	40,32	27,35	2,90	0,5	Высокоэвтрофное	187,3

где наблюдения на рейдовых вертикалях ведутся непрерывно с 1964 г. С 1964 до 2013 г. функционировал пост на оз. Мястро. В настоящее время возможно восстановление данных о температуре воды в озере на основании данных гидрологических наблюдений на оз. Нарочь и метеонаблюдений на ближайшей метеостанции Лынтупы. Ряды наблюдений на озерах Дривяты, Неццердо и Лукомское также имеют значительную длину (с конца 1960-х гг.). Пост на озере Неццердо закрыт в 2013 г. С 1972 года присутствуют данные наблюдений по озерам Полесья. В конце 1960-х–1980-х гг. существовали гидрологические посты с рейдовыми вертикалями на озерах Мядель, Отолово, Сенно, Дрисвяты, Лепельское, Освейское. Наиболее длительные ряды наблюдений получены по озерам Мядель, Отолово и Лепельское (до 20 лет), что позволило выявить ключевые особенности их теплового режима и установить зависимости температур воды и теплозапасов от метеословий.

Расчет теплосодержания водной массы проводился по слоям, ограниченными горизонтами измерения температуры воды. Формула для его расчета имеет следующий вид:

$$\Theta = c_p \rho T W, \quad (1)$$

где:  $c_p$  – удельная теплоемкость воды, Дж/кг·°С;  $\rho$  – ее плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – средняя температура слоя, °С;  $W$  – объем воды в слое, м<sup>3</sup>.

Общий теплозапас озера – это сумма теплозапасов всех выделенных слоев с разной температурой и плотностью.

С целью выявления изменений термической структуры озер и водохранилищ была использована модель *Lake Analyzer*, представляющая собой программный код в сочетании с поддержкой инструментов визуализации для расчета показателей перемешивания и стратификации, которые влияют на биогеохимические циклы озер и водохранилищ. Программа создана для анализа данных, собранных с озерных буев, что накладывает некоторые ограничения на ее использование на озерах с редкими наблюдениями. Доступными выходными данными в *Lake Analyzer* явля-

ются: температура воды, скорость ветра, глубина термоклина, сила трения, число Веддерберна, термическая устойчивость Шмидта, частота плавучести и др. Модель предоставляет набор программ и передового опыта для сравнения перемешивания и показателей стратификации в озерах, расположенных в районах, отличающихся по климату, гидрографии и др., а также позволяет более детально представить биогеохимические преобразования в различных масштабах (READ, MURAOKA, 2011).

В качестве выходных данных для моделирования использовались батиграфические кривые озера, уровни воды, результаты измерения температуры воды на рейдовых вертикалях за 1964–2017 гг. и данные о скорости ветра на ближайших метеостанциях. Основными анализируемыми параметрами стали глубина металимниона, термическая устойчивость Шмидта, число Веддерберна и частота плавучести Брента-Вяйсяля. Эти характеристики отражают особенности перемешивания водной массы, перераспределения в ней тепла и растворенных веществ.

Сопротивление слоя воды перемешиванию тем сильнее, чем больше градиент плотности, зависящий, в свою очередь, от градиента температуры. Для оценки устойчивости водного слоя к перемешиванию используется квадрат частоты плавучести:

$$N^2 = \frac{g}{z} \frac{\partial \rho}{\partial z}, \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\rho$  – плотность воды,  $z$  – глубина слоя воды, отсчитываемая от водной поверхности (FISCHER и др., 1979, ВОЕНРЕР, SCHULZE, 2008).

Чем выше этот показатель, тем большая внешняя работа требуется для перемешивания водного слоя; отрицательные значения  $N^2$  (мнимые  $N$ ) указывают на его нестабильность и самопроизвольное перемешивание. Важным параметром, влияющим на скорость перемешивания, является устойчивость водной массы. Общая устойчивость озер определяется как работа, которую необходимо совершить для перевода озера в состояние гомотермии в адиабатических условиях. Данная величина рассчитывается по формуле (3)

и выражается в джоулях на единицу площади поверхности озера.

$$W_t = \frac{g}{\rho_0} \int_0^{z_m} (z - z_v) \rho_z A_z dz \quad (3)$$

где  $z_v$  – глубина центра масс озера при постоянной плотности,  $z_m$  – максимальная глубина,  $\rho_z$  – плотность воды на глубине  $z$ ,  $A_0$  – общая площадь озера,  $A_z$  – площадь озера под изобатой  $z$  м,  $V$  – общий объем озера.

Число Веддерберна показывает баланс между ветровым воздействием и силой плавучести и рассчитывается по следующей формуле:

$$W = \frac{g' z_e^3}{\rho_0 L_s^3} \quad (4)$$

где  $g' = g(\Delta\rho/\rho_0)$  – приведенное ускорение свободного падения из-за изменения плотности ( $\Delta\rho$ ) между гипolimнионом ( $\rho_0$ ) и эпилим-

нионом ( $\rho_e$ ),  $z_e$  – глубина перемешиваемого слоя,  $L_s$  – длина разгона волны,  $u^*$  – сила трения из-за ветрового воздействия (READ, MURAOKA, 2011). При значении числа Веддерберна менее 3, водоем полностью перемешан. Если оно находится в пределах от 3 до 10, стратификация усиливается. В условиях, когда данный показатель принимает значение больше 10, слабое ветровое перемешивание затрагивает только тонкий поверхностный слой, а водная масса стратифицирована (FISCHER и др., 1979, ВОЕНРЕР, SCHULZE, 2008).

## Результаты и их обсуждение

В ходе анализа многолетней динамики тепло-содержания водной массы и термической устойчивости в летний период была выявлена тенденция к их увеличению, как показано на рис. 2 и 3.

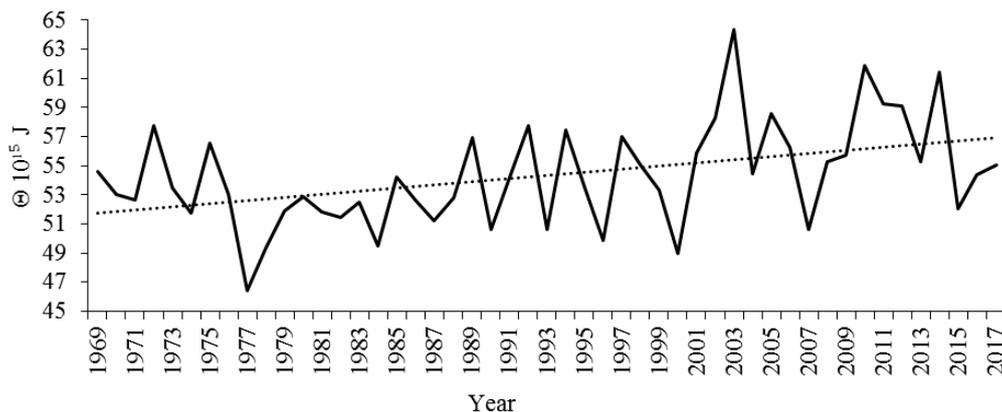


Рис. 2. Многолетняя динамика максимального теплозапаса оз. Нарочь за период 1969–2017 гг.

Rys. 2. Wieloletnia dynamika maksymalnych zasobów ciepła w jez. Narocz w latach 1969–2017

Fig. 2. Long-term dynamics of heat storage of Lake Naroch for the period 1964–2017

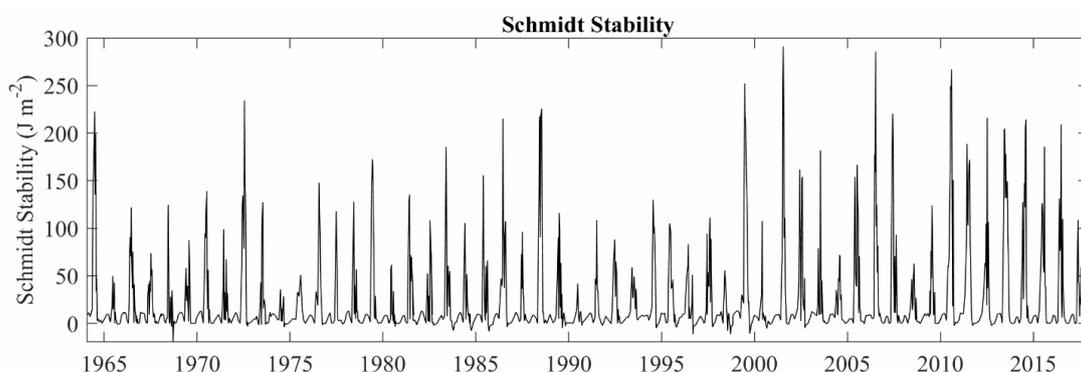


Рис. 3. Многолетняя динамика термической устойчивости оз. Нарочь за период 1964–2017 гг.

Rys. 3. Wieloletnia dynamika stabilności termicznej w jez. Narocz w latach 1964–2017

Fig. 3. Long-term dynamics of thermal stability of Lake Naroch for the period 1964–2017

Это объясняется более интенсивным прогреванием воды вследствие роста температур воздуха. В результате поверхностные слои воды имеют высокую температуру, в то время как придонные часто оказываются холоднее из-за того, что термоклин становится лучше выражен и препятствует теплообмену между эпилимнионом и гипolimнионом.

Из представленных рисунков видно, что в стратифицированном озере Нарочь в период 1999–2017 гг. термическая устойчивость была значительно выше, чем в предшествующий период. В это время стратификация водной массы отсутствовала только в 2004 и 2008 гг.

В мелких открытых водоемах, из-за разницы приповерхностных и придонных температур в десятые доли градуса термическая устойчивость даже летом часто близка к нулю, а четких тенденций в ее изменении выявлено не было. В озере Выгонощанском макси-

мальное ее значение равно 1,4 Дж/м<sup>2</sup>, в более глубоком озере Нещердо оно достигает 19 Дж/м<sup>2</sup>. Небольшие отрицательные значения термической устойчивости в большинстве озер наблюдаются в периоды весенней и осенней циркуляции. В мелководных озерах такое явление может фиксироваться летом при мезотермии, вызванной похолоданием, когда поверхностный слой воды резко охлаждается, но процесс перемешивания еще не распространился на всю водную толщу. В результате под охлажденным поверхностным слоем располагается более теплая и легкая вода. Как правило, данное явление носит кратковременный характер, однако нередко встречается в материалах гидрологических наблюдений.

Сравнение годового хода температур воздуха и скорости ветра с динамикой температур воды показало наличие тесной связи между ними, о чем свидетельствуют рис. 4–7.

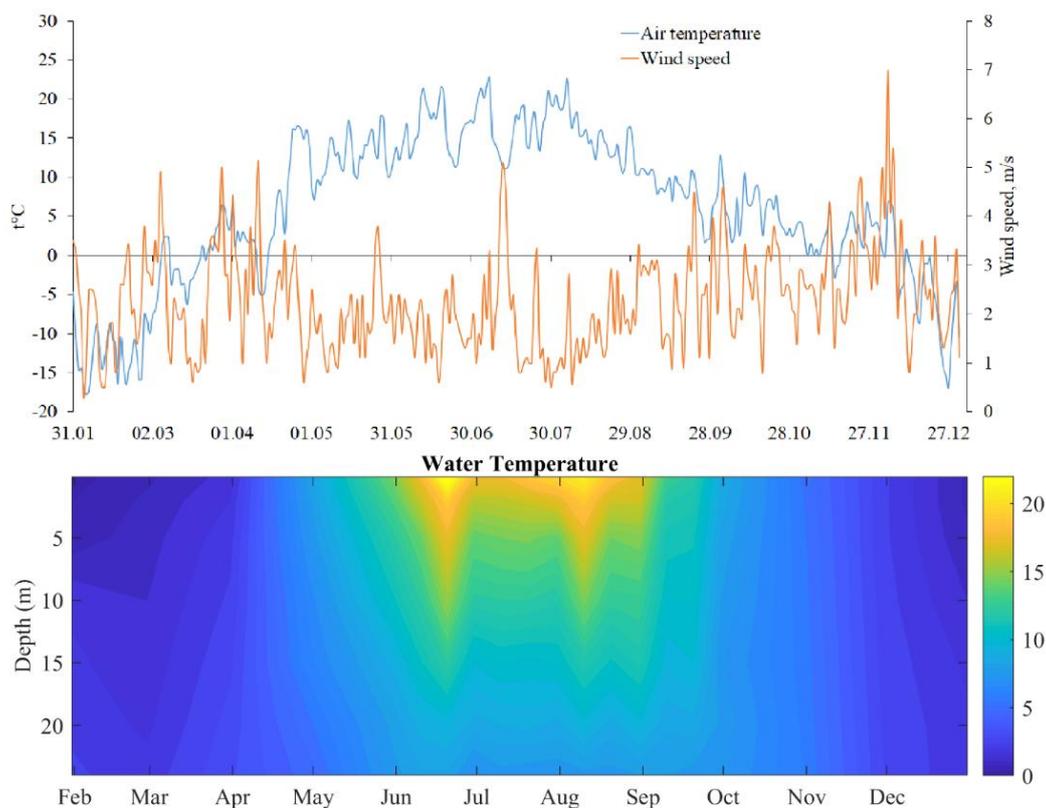


Рис. 4. Внутригодовой ход температур воздуха, скорости ветра (метеостанция Ёынтупы) и температуры воды в оз. Мядель, 1986 г.

Rys. 4. Roczny przebieg temperatury powietrza, prędkości wiatru (stacja meteorologiczna Ёынтупы) i temperatury wody w jez. Miadel w 1986 r.

Fig. 4. Intra-annual course of air temperature, wind speed (Lyntupy meteorological station) and water temperature in Lake Myadel, 1986

Как видно из рис. 4, погодные условия являются определяющим фактором в развитии температурной стратификации и характере процессов перемешивания. На примере озера Мядель можно проследить, что момент наиболее сильного нагревания водной массы наступает несколько позже времени, когда отмечаются наиболее высокие температуры воздуха. Из-за ветрового перемешивания происходит тепло- и массообмен с более глубоко расположенными слоями. В результате термоклин углубляется, а мощность эпилимниона возрастает. Если перемешивание прекра-

щается, приток тепла к нижней границе эпилимниона также ослабевает, а его мощность снижается. Среди исследованных озер аналогичный режим перемешивания имеют озеро Лепельское и северный плес озера Отолово. При длительной антициклонической погоде со слабыми ветрами, температурная стратификация формируется в озере Нарочь, однако из-за большой площади и длины разгона волны разница поверхностных и придонных температур не превышает 12–13°C, в то время как в озере Отолово она может достигать 19°C.

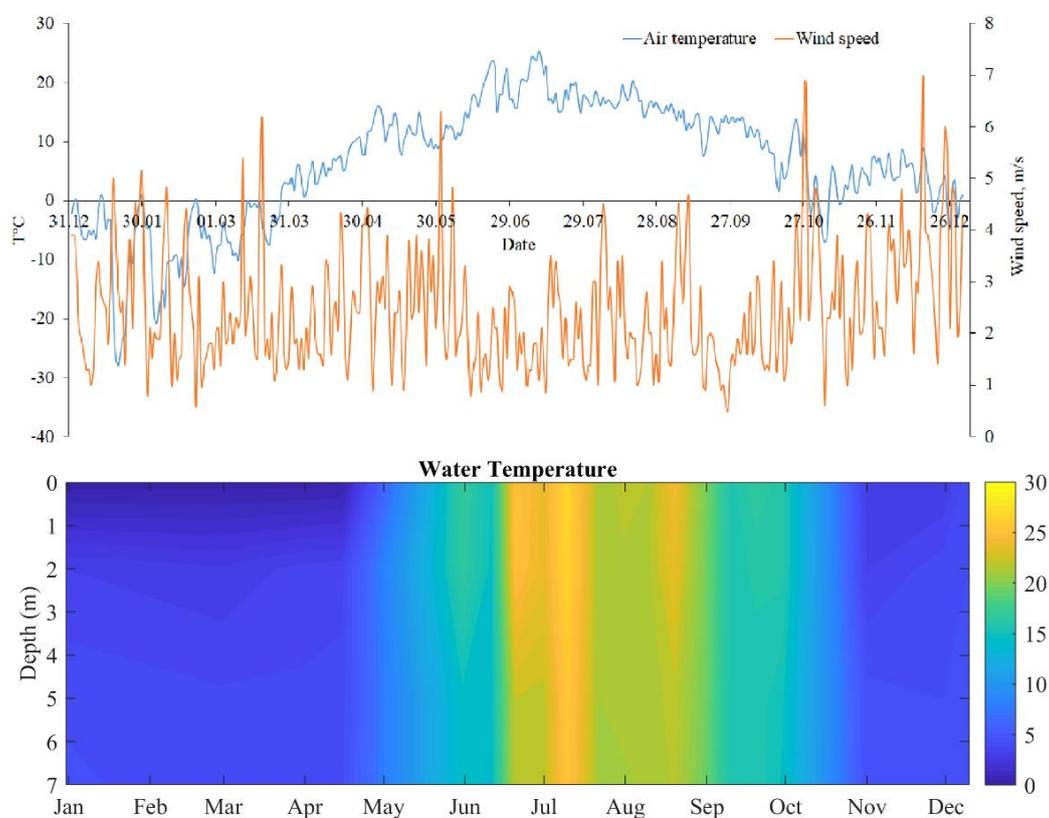


Рис. 5. Внутригодовой ход температур воздуха, скорости ветра (метеостанция Верхнедвинск) и температуры воды в оз. Нещердо, 1986 г.

Rys. 5. Roczny przebieg temperatury powietrza, prędkości wiatru (stacja meteorologiczna Wierchniedwinsk) i temperatury wody w jez. Nieszczerdo w roku 1986

Fig. 5. Intra-annual course of air temperature, wind speed (Verkhnedvinsk meteorological station) and water temperature in Neshcherdo lake, 1986

Из-за высокого коэффициента открытости (7,24) озеро Нещердо является нестратифицированным. Очень редко формируется небольшой перепад температур по глубине, как правило не превышающий 4°C. Иногда, в периоды жаркой безветренной погоды, разность поверхностной и придонной температур мо-

жет достигать 6–7°C. Например, подобная ситуация сложилась в озере в конце июля 2013 года, когда температура воды у поверхности составляла 24,6°C, а у дна, на глубине 7 м, – 18,3°C. Металимнион в этом случае располагался на глубинах 2–5 м. Температурная стратификация в данном водоеме является скорее

исключением. Типичные температурные условия в водоеме иллюстрирует рис. 5. На нем видно, что независимо от скорости ветра в озере Нещердо наблюдается состояние, близкое к гомотермии.

В озере Выгонощанское, глубина которого не превышает 2,5 м, температурная стратификация в безледоставный период не формируется. Повышение температуры воздуха вызы-

вает очень быстрое прогревание всей водной толщи, похолодание приводит к охлаждению водной массы, что иллюстрирует рис. 6. Аналогичная ситуация наблюдается в оз. Червоное, средняя глубина которого составляет 0,7 м, максимальная – 3,1 м. Даже при повышении температуры воздуха и воды такие озера останутся нестратифицированными.

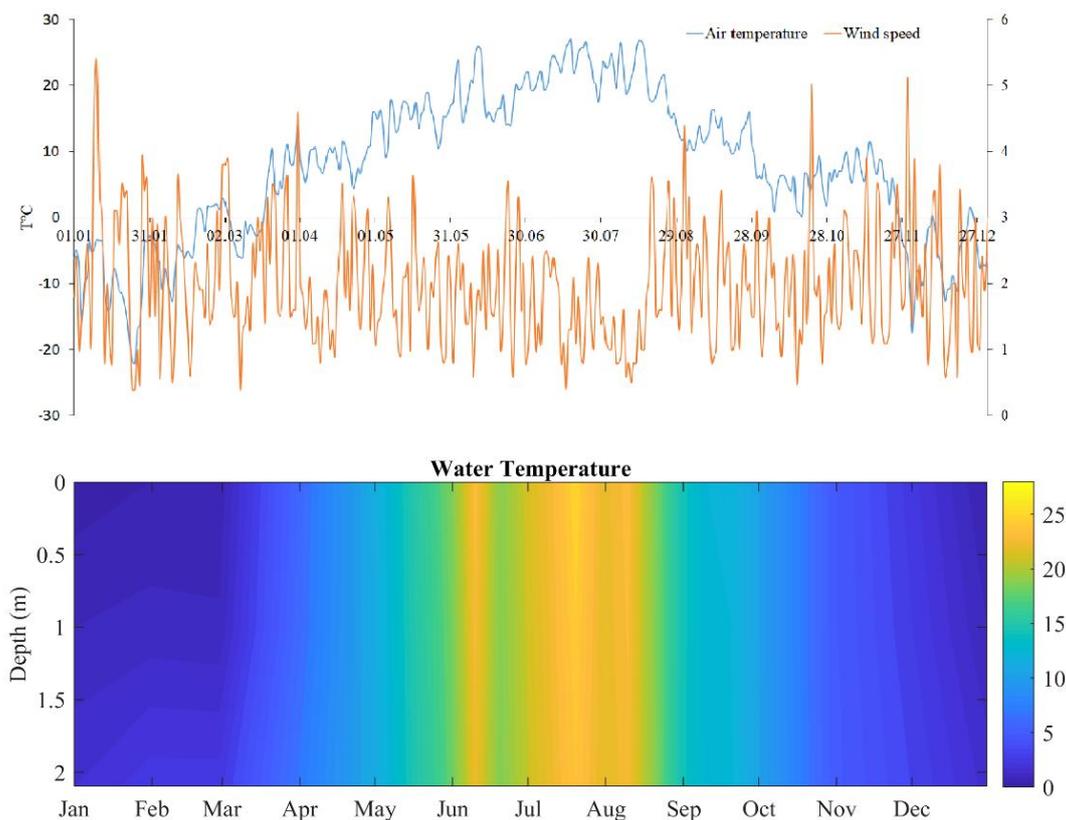


Рис. 6. Внутригодовой ход температур воздуха, скорости ветра (метеостанция Ивацевичи) и температуры воды в оз. Выгонощанское, 2010 г.

Rys. 6. Roczny przebieg temperatury powietrza, prędkości wiatru (stacja meteorologiczna Iwacewicze) i temperatury wody w jez. Wygonoszczanskoje w roku 2010

Fig. 6. Intra-annual course of air temperature, wind speed (Ivatsevichi meteorological station) and water temperature in Lake Vygonoshchanskoje, 2010

Наибольший интерес при исследовании вертикальной термической структуры озер представляют глубокие стратифицированные водоемы, примером которого является оз. Волосо Южный, расположенное в Браславском районе. Стационарные наблюдения за температурой воды на нем отсутствуют, а периодические измерения проводятся НИЛ озероведения и НПЦ по биоресурсам НАН Беларуси. При анализе данных 14 измерений температуры воды на различных глубинах, проведен-

ных летом и осенью 1984 г., а также температур воздуха и скорости ветра в это время были выявлены сильные связи между этими параметрами. Коэффициент корреляции между температурой воды верхнего пятиметрового слоя и температурой воздуха за трое предшествующих суток равен 0,92. Поэтому температуры воздуха были использованы для детализации хода температур воды между сроками наблюдений. Полученный результат представлен на рис. 7.

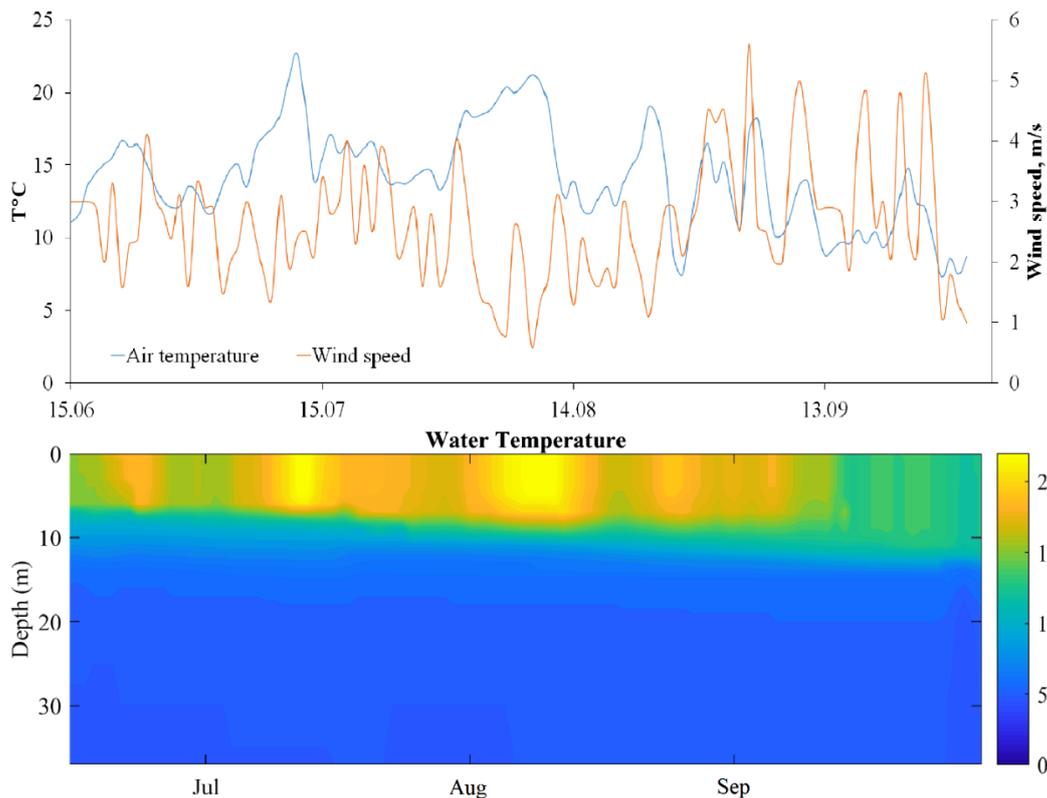


Рис. 7. Ход температур воздуха, скорости ветра (метеостанция Верхнедвинск) и температуры воды в оз.Волосо Южный, 15.06–30.09.1984 г.

Rys. 7. Przebieg temperatury powietrza, prędkości wiatru (stacja meteorologiczna Wierchniedwinsk) i temperatury wody w jeziorze Wołoso Jużnyj w okresie 15.06–30.09.1984 r.

Fig. 7. The course of air temperatures, wind speed (Verkhnedvinsk meteorological station) and water temperatures in Voloso Yuzhniy lake, 15.06–30.09.1984

В 2018 году на озере Волосо Южный были проведены наблюдения за температурой воды и вертикальным распределением кислорода. В условиях жаркой антициклонической погоды сформировался резкий термоклин, термическая устойчивость достигала  $991 \text{ Дж/м}^2$  (в 1984 г – до  $846 \text{ Дж/м}^2$ ), а содержание кислорода у дна составляло всего 12,3% насыщения. При сохранении тенденции к потеплению в гипolimнионе этого уникального озера, в также ряда других глубоких стратифицированных озер, сформируется бескислородная зона, что может привести к гибели реликтовых ракообразных. Основной чертой олиготрофии является ортоградная кривая распределения кислорода. В условиях повышения температуры воздуха и воды она становится клиноградной, свойственной эвтрофным озерам.

Между термической устойчивостью и температурой воздуха существует прямая нели-

нейная зависимость, общий вид которой для оз. Нарочь показан на рис. 8.

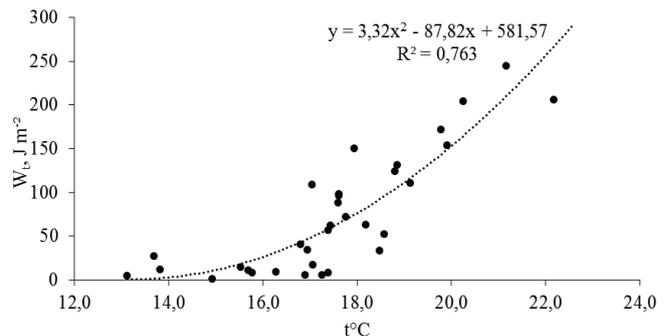


Рис. 8. Зависимость термической устойчивости оз. Нарочь 1 августа от температуры воздуха, 25–31 июля 1977–2017 гг.

Rys. 8. Zależność stabilności termicznej jeziora Narocz 1 sierpnia od temperatury powietrza, 25–31 lipca 1977–2017 r.

Fig. 8. Dependence of thermal stability lake Naroch August 1 from the air temperature, July 25–31, 1977–2017

В других стратифицированных или слабо-стратифицированных озерах она имеет аналогичный вид, в нестратифицированных – отсутствует.

С ростом температуры воздуха стратификация водоема усиливается, вертикальный градиент плотности воды растет, вследствие чего увеличивается термическая устойчивость. При помощи полученного уравнения регрессии при наличии качественного прогноза погоды возможен прогноз термической устойчивости водоема.

Следует отметить, что термический режим разнотипных водоемов, расположенных в сходных физико-географических условиях, существенно различается. Так, если во всех подпрудных озерах Поозерья со значительным коэффициентом открытости и средними глубинами 4–9 м в многолетнем разрезе наблюдаются почти синхронные колебания максимального теплозапаса и теплового бюджета, то между водоемами с различным генезисом и морфометрией (например, подпрудными, сложными и ложбинными котловинами) по-

добной связи нет. Это обусловлено различиями в рельефе водосбора и самого дна озер, а также в конфигурации самих котловин и в их направлении относительно преобладающих ветров. Все это влечет за собой отличия в механизмах теплопереноса в водной массе. В открытых котловинах происходит активное ветровое перемешивание, охватывающее всю водную массу. Если котловина глубокая, с крутыми склонами, т.е. укрыта от ветра, то перемешивание не будет играть существенной роли в теплообмене. Следовательно, вода труднее прогревается, и теплозапас ложбинного озера при аналогичном объеме водной массы будет меньше теплозапаса подпрудного озера.

Анализ взаимосвязи теплосодержания водной массы озер и водохранилищ с метеоусловиями на водосборах проводился путем расчета коэффициентов корреляции между ним и температурой воздуха. Полученные коэффициенты корреляции приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между средней за 5 суток температурой воздуха и теплозапасом водной массы озер за безледоставный период (1978–2017 гг.)

Tabela 2. Współczynniki korelacji między średnią dla 5 dób temperaturą powietrza i zasobami ciepła masy wodnej jezior w okresie bezlodowym (1978–2017 r.)

Table 2. Correlation coefficients between the average for 5 days air temperature and the heat storage of the water mass of the lakes during the ice-free period (1978–2017)

Водоем	Месяцы	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Нарочь		0,474	0,644	0,680	0,871	0,732	0,692	0,403
Мястро		0,581	0,691	0,795	0,810	0,552	0,608	0,563
Нешердо		0,446	0,608	0,758	0,648	0,402	0,564	0,672
Дривяты		0,452	0,589	0,450	0,629	0,442	0,594	0,434
Лукомское		0,504	0,565	0,705	0,616	0,505	0,587	0,442
Выгонощанское		0,859	0,783	0,720	0,705	0,504	0,724	0,817

Наиболее высокие коэффициенты корреляции характерны для температуры воздуха за 5 последних суток июля с теплозапасом на 1 августа. Именно к этому времени (иногда немного позже) он достигает своей максимальной величины. Довольно слабая связь теплозапаса на 1 сентября с температурой воздуха за 27–31 августа объясняется большой теплоемкостью, и, как следствие этого, инерционностью водной массы по отношению к процессам охлаждения. Температуры воздуха

в этот период могут быть сравнительно низкими, в то время как водоем со значительным объемом водной массы медленно отдает тепло, накопленное при летнем нагревании.

В соответствии с различными сценариями изменения климата прогнозируется рост температуры воздуха во все сезоны, но масштабы роста существенно отличаются. Согласно наиболее вероятному **сценарию А1В** (где [ссылка не него?](#)) ожидается повышение средних летних температур воздуха на 1°C,

и по полученным уравнениям регрессии возможно прогнозирование изменения теплозапаса водоемов. Например, при повышении средней температуры воздуха за последние 7 суток июля на водосборе озер Нарочи и Мястро до 20°C их теплозапас изменится с 55 до 60·10<sup>15</sup> Дж и с 6,7 до 7·10<sup>15</sup> Дж соответственно. Сопоставимым окажется рост теплосодержания других изучаемых водоемов.

По поводу изменения минимального теплозапаса прийти к однозначному выводу сложнее ввиду отсутствия четко выраженных тенденций и его сильной зависимости от трофического статуса и внутриводоемных процессов. Вероятнее всего, в большинстве водоемов он будет увеличиваться. Его уменьшение возможно при снижении антропогенной нагрузки на водоемы. Снижение теплового бюджета при этом будет менее значительным, чем максимального теплозапаса.

Достаточно важным и интересным показателем климатических изменений является температура гипolimниона. При росте средней температуры воздуха на 1°C и скоростях ветра около 3 м/с (что соответствует ее среднегодовым значениям для территории Беларуси), не способствующих перемешиванию, может произойти охлаждение более глубоких слоев. В оз. Нарочь наблюдается тенденция к уменьшению придонных температур воды в летний период. За 50 лет они снизились в среднем на 0,5°C, но за расчетный период с 1992 по 2015 гг. произошло их снижение на 1,5°C, а до этого происходили циклические колебания, почти не выраженные в настоящее время. Такая закономерность характерна для периодов потепления климата и связана с сильным нагреванием эпилимниона и ростом термической устойчивости.

## Заключение

Исходя из выявленных закономерностей, в ближайшем будущем ожидается увеличение летних теплозапасов озер на 5–8%, вызванное ростом температур воздуха, который

сильнее всего выражен в летний период. По поводу изменения минимального теплозапаса прийти к однозначному выводу сложнее ввиду отсутствия четко выраженных тенденций и его сильной зависимости от трофического статуса и внутриводоемных процессов. Вероятнее всего, при эвтрофировании водоемов он будет увеличиваться, т.к. из-за повышения теплосодержания водной массы в летний период будет происходить рост первичной продукции, а в зимний период органическое вещество распадается с выделением тепла, что приводит к разогреванию придонных слоев выше температуры максимальной плотности (до 4,3–4,7°C в оз. Неццердо). Его уменьшение возможно при снижении антропогенной нагрузки на водоемы. Наиболее ярким примером таких озер является оз. Лукомское, подверженное тепловому загрязнению. Оно может служить модельным водным объектом при исследовании влияния повышения температуры воздуха на гидрологический и термический режим озер Беларуси.

За последние два десятилетия возросла термическая устойчивость исследованных водоемов, но пока это не поспособствовало заметному усилению термической стратификации в летний период. Исключением является озеро Нарочь, где в настоящее время заметно снижение температуры воды придонных слоев на фоне роста температуры поверхности озера. Поскольку водная масса большинства озер перемешивается до дна, в них складывается благоприятный газовый режим, что способствует развитию гидробионтов. Более значительный рост термической устойчивости (выше 300 Дж/м<sup>2</sup> для озера Нарочь) может повлечь за собой формирование термоклина, и, как следствие, снижение концентрации кислорода в придонных слоях. В мезотрофных с признаками олиготрофии стратифицированных озерах (Волосо Южный), трофический статус которых определяется как мезотрофный с признаками олиготрофии, уже отмечается такая тенденция. При высоких температурах воздуха кривая распределения кислорода в них приобретает клиноградный характер. Содержание его у дна падает до 12% насыщения. А основной чертой олиготрофии

является ортогоградная кривая распределения кислорода.

Результаты исследования могут быть использованы для создания прогнозных моделей динамики термического режима озер и водохранилищ при различных сценариях изменения климата, а также с целью исследования его взаимосвязи с гидрохимическими и гидробиологическими процессами, определяющими скорость эвтрофирования водоемов как в естественных условиях, так и при возрастающей антропогенной нагрузке.

*Благодарности.* Автор выражает благодарность за предоставленные данные кандидату биологических наук, ведущему научному сотруднику НПЦ по биоресурсам НАН Беларуси, В. В. Вежновцу.

## Литература

- Архив погоды [http://gr5.by/Архив\\_погоды](http://gr5.by/Архив_погоды) Дата: 20.06.2019.
- Вежновец В., 1984: Биология реликтового рачка *Limnocalanus Grimaldii* var. *Macrurus* (Sars) и его продукционно-энергетическая характеристика. Дис. ... канд. биол. наук: 03.00.18. Минск, 206 с.
- Власов Б., Якушко О., Гигевич Г., Рачевский А., Логинова Е., 2004: Озера Беларуси. Справочник. РУП Минсктиппроект, Минск: 284 с.
- Волчек А., 2016: Особенности колебаний температуры воды озер Белорусского Полесья в условиях изменяющегося климата. Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья. В: Гусаков Г. Б. (гл. ред.): сборник докладов Международной научной конференции, в 2 т. Минск, 14 – 17 сент. 2016 г. Т. 1. Белорусская наука, Минск: 344–348.
- Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Минск, 1965–2018 (до 1977 г. – Гидрологический ежегодник).
- Ефремова Т., Пальшин Н., Белашев Б., 2016: Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) Водные ресурсы, 43, 2: 228–238.
- Кирвель П., 2010: Закономерности формирования термического и ледового режимов озер Беларуси. Дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23. Минск: 214 с.
- Климат Республики Беларусь в 2015 году (<http://www.pogoda.by/press-release/?page=528>) Дата: 20.06.2019.
- Суховило Н. Ю., 2017а: Роль метеорологических факторов в перемешивании водоемов Беларуси. Вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси. В: Павловский А. Т (ред.): Сборник научных статей, Гомель, 10 ноября 2017 г.: в 2 ч, ч. 2. ГГУ им. Ф. Скорины, Гомель: 198–203.
- Суховило Н. Ю., 2017б: Формирование термической структуры водоемов Беларуси. Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 220-летию Ф. П. Литке в рамках XIII Большого географического фестиваля, Санкт-Петербург, 7–9 апреля 2017 г. Свое издательство, СПб: 233–239.
- Шестое Национальное сообщение по осуществлению Рамочной конвенции об изменении климата в контексте региональных проблем устойчивого развития Республики Беларусь, 2014: Материалы международного семинара 5–6 ноября 2014 г. (Сост.: А. А. Савастенко, А. В. Яковенко). Минск: Бел НИЦ “Экология”: 162 с.
- 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., 2009: Lakes as sentinels of climate change. *Limnol. Oceanogr.*, 6, 2, 54.: 2283–2297.
- Ambrosetti W., Barbanti L. 2002a: Physical limnology of Italian lakes. 1. Relationship between morphometry and heat content. *Journal of Limnology*, 61: 147–157.
- Ambrosetti W., Barbanti L., 2002b: Physical limnology of Italian lakes. 2. Relationship between morphometric parameters, stability and Birgean work. *Journal of Limnology*, 61: 159–167.
- Austin J. A., Colman S. M., 2008: A century of temperature variability in Lake Superior. *Limnol. Oceanogr.*, 53 (6): 2724–2730.
- Birge E. A., 1916: The work of the wind in warming a lake. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters, Sc.*, 18: 341–391.
- Boehrer B., Schultze M., 2008: Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*, 46, 2: 27 p.
- Butcher J., Nover D., Johnson T., Clark Ch., 2015: Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change. *Climatic Change*, 129: 295–305.

- Dobiesz N., Lester N., 2009: Changes in mid-summer water temperature and clarity across the Great Lakes between 1968 and 2002. *J. Great Lakes Research*, 35: 371–384.
- Dokulil M. T., 2013: Impact of climate warming on European inland waters. *Inland Waters*, 4: 27–40.
- Fischer H., List J., Brooks N., Koh R., Imberger J., 1979: *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, New York: 487 p.
- George G., 2010: *Impact of Climate Change on European Lakes*. Springer, Dordrecht: 569 p.
- Gorham E., 1964: Morphometric control of annual heat budgets in temperate lakes *American Society of Limnology and Oceanography*, 9, 4: 525–529.
- Imboden D. M., Wüest A., 1995: *Mixing mechanisms in lakes. Physics and Chemistry of Lakes*. Springer, Berlin: 83–138.
- Lake analyzer web <http://lakeanalyzer.gleon.org>. Date: 25.10.2017.
- Read J. S., Muraoka K., 2011: *Lake Analyzer Ver. 3.3 User Manual*. Global Lake Ecological Observatory Network: 21 p.
- Weinberger S., Vetter M., 2014: Lake heat content and stability variation due to climate change: coupled regional climate model (REMO) – lake model (DYRESM) analysis *J. Limnol.*, 73, 1: 109 – 121.
- Williamson C., Saros J., Vincent W., Smol J. P., 2009: Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnol. Oceanogr.*, 6, 2, 54: 2273–2282.

*Поступила в редакцию: 23 июня 2019*

*Wpłynął do redakcji: 23 czerwca 2019*

*Received: 23 June 2019*