

5. Смирнов А.И., Дурнаева В.Н. Оценка переработки берегов Павловского водохранилища на реке Уфа с использованием ГИС-технологий // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 3 томах. Пермь, 2019. С. 197-202.

6. Финаров Д.П. Геоморфологический анализ и прогнозирование переформирования береговой зоны и дна водохранилищ. Л.: Наука, 1986. 241 с.

УДК 556.555.4

Д.И. Соколов, О.Н. Ерина, М.А. Терешина, Dmitriy.Sokolov@yandex.ru
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕРА ГЛУБОКОГО В 2018-2021 ГГ.

Детальные наблюдения за температурой воды озера Глубокое в 2018-2021 гг. показали, что современный режим озера отличается от такового в первой половине XX века. Переход от весенней циркуляции к летней стратификации происходит на несколько недель раньше и в некоторые годы с меньшей стабильностью. Сезонный термоклин формируется, как и раньше, на глубине 2-4 м и опускается летом до глубины 8-10 м, но вертикальная устойчивость водной толщи выше. Максимальные значения теплозапаса и средней температуры воды в озере увеличились в среднем на 16% и 8%. Причиной этого могут быть как климатические изменения, так и увеличение прозрачности воды в результате мелиоративных работ на водосборе. Переход от летней стратификации к осенней гомотермии происходит, как и раньше, при температуре воды, близкой к 6 °С, но почти на месяц позже.

Ключевые слова: озеро Глубокое, термический режим, стратификация, вертикальная устойчивость, теплозапас

D.I. Sokolov, O.N. Erina, M.A. Tereshina, Dmitriy.Sokolov@yandex.ru
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

THERMAL REGIME OF LAKE GLUBOKOYE IN 2018-2021

Detailed observations of the water temperature of Lake Glubokoe in 2018-2021 showed that the modern regime of the lake differs from that in the first half of the XX century. Transition from spring circulation to summer stratification occurs several weeks earlier and in some years with less stability. The seasonal thermocline is formed, as before, at 2–4 m depths and dips to 8–10 m depth during the summer, but the vertical stability of the water column is higher. The maximum values of heat storage and average water temperature in the lake have increased on average by 16% and 8%. The reason can be both climatic changes and increase of water transparency as a result of reclamation works on the watershed. The transition from summer stratification to autumn homothermia occurs, as before, at water temperatures close to 6 °C, but almost a month later.

Keywords: Lake Glubokoe, thermal regime, stratification, vertical stability, heat storage

Введение

Многочисленные исследования термического режима сотен разнотипных озер по всему миру свидетельствуют о существенном росте их поверхностной температуры с конца 1970-х – начала 1980-х гг., особенно в умеренных широтах [2-4; 6; 9; 10; 12; 14]. При этом даже в пределах одного региона тренды характеризуются очень большим разбросом (вплоть до охлаждения в отдельных озерах) [10]. Различаются эти тренды и по сезонам [9; 11]. Еще менее очевидны изменения температуры гипolimниона [6; 8; 9].

Прогрев озер приводит к заглублению термоклина [12], увеличению продолжительности и устойчивости летней стратификации [7-9; 13] и, как следствие, изменениям ледового режима, уровня воды, прозрачности, длительности вегетационного периода, биопродуктивности и биоразнообразия, темпов эвтрофирования, эмиссии парниковых газов и т.д.

В настоящее время чрезвычайно сложно разделить воздействие природных и антропогенных факторов на формирование гидроэкологического состояния водоемов, т.к. процент водных экосистем, не трансформированных человеческой деятельностью, невелик и продолжает стремительно снижаться (особенно в Московском регионе). В этом отношении особый интерес представляет озеро Глубокое, водосбор которого расположен на территории государственного природного заказника в Рузском районе Московской области и отличается малой антропогенной нарушенностью.

На протяжении более чем вековой истории комплексных исследований озера Глубокое детально термический режим изучали лишь в середине XX в. [1; 5], с тех пор сопоставимых исследований не производилось. С 2017 г. нами начаты систематические наблюдения за температурой воды озера для восполнения этого пробела.

Материалы и методы

Основными материалами настоящей работы послужили данные термометрической косы, оснащенной логгерами температуры воды на глубинах 0.5, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 20, 26 м и устанавливаемой преимущественно в периоды открытой воды в 2018 г. (с 13 мая по 3 ноября), 2019 г. (с 25 апреля по 12 ноября), 2020 г. (с 10 июля до весны следующего года) и в 2021 г. (с 14 июня по 14 ноября) в центральной, самой глубоководной части озера. Дополнительным материалом послужили данные рейдовых наблюдений на той же вертикали, проводимых нами с марта 2018 г. на регулярной основе с частотой 1-3 раза в месяц и включавших измерение температуры воды на горизонтах 0.1, 0.5, 1 м и далее каждый метр до придонного горизонта (28 м).

В качестве основных характеристик термического режима озера по аналогии с работой [1] вычислены теплозапас Θ , средняя температура всего озера $T_{\text{ср}}$, устойчивость его водной массы S .

Работа проводилась на базе биологической станции «Глубокое озеро» Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН.

Анализ результатов

Минимальный теплозапас в водной массе озера Глубокого в фазу зимней стагнации (54 ТДж при средней температуре водной толщи $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) зафиксирован 6-7 декабря 2020 г., через месяц после полного разрушения летней стратификации и спустя неделю с момента начала формирования обратной зимней стратификации. Вертикальная устойчивость за несколько дней возросла от 0 до $7\text{ кг}\cdot\text{м}\cdot 10^5$, оставалась практически неизменной в течение всего периода ледостава, за последние недели зимы в условиях частичной подледной циркуляции снизилась с 7 до $5\text{ кг}\cdot\text{м}\cdot 10^5$ и затем за несколько дней разрушения ледяного покрова – до нуля. После более холодных зим в 2018 и 2021 гг. в конце марта еще наблюдалась обратная зимняя стратификация, а после более теплых зим 2019 г. и тем более 2020 г. уже происходило конвективное перемешивание при температуре, близкой к $4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В 2019 г. к концу апреля поверхностные слои уже прогрелись до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температурный градиент на глубине 2-4 м достиг $2^{\circ}\text{C}/\text{м}$, что позволяет говорить о появлении слоя температурного скачка (СТС). В 2021 г. СТС с температурным градиентом более $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ в слое 2-4 м сформировался только в начале второй декады мая.

Положение металимниона все четыре года изменялось в течение летней стратификации однотипно. В начале лета термоклин располагался на глубине 2-3 м и характеризовался градиентом температуры примерно $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$, в течение июня заглублялся до 3-5 м с увеличением градиентов до $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$, в июле-августе – до 4-6 м. В 2018 и 2021 г. максимальная устойчивость термоклина наблюдалась во второй половине июля (градиент достигал $6\text{--}7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$), в 2019 и 2020 гг. – во второй половине июня (градиент $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$). В сентябре-октябре по мере охлаждения эпилимниона и усиления динамического перемешивания термоклин быстро погружался до глубины 14-16 м, где прекращал существование с переходом к полной осенней циркуляции.

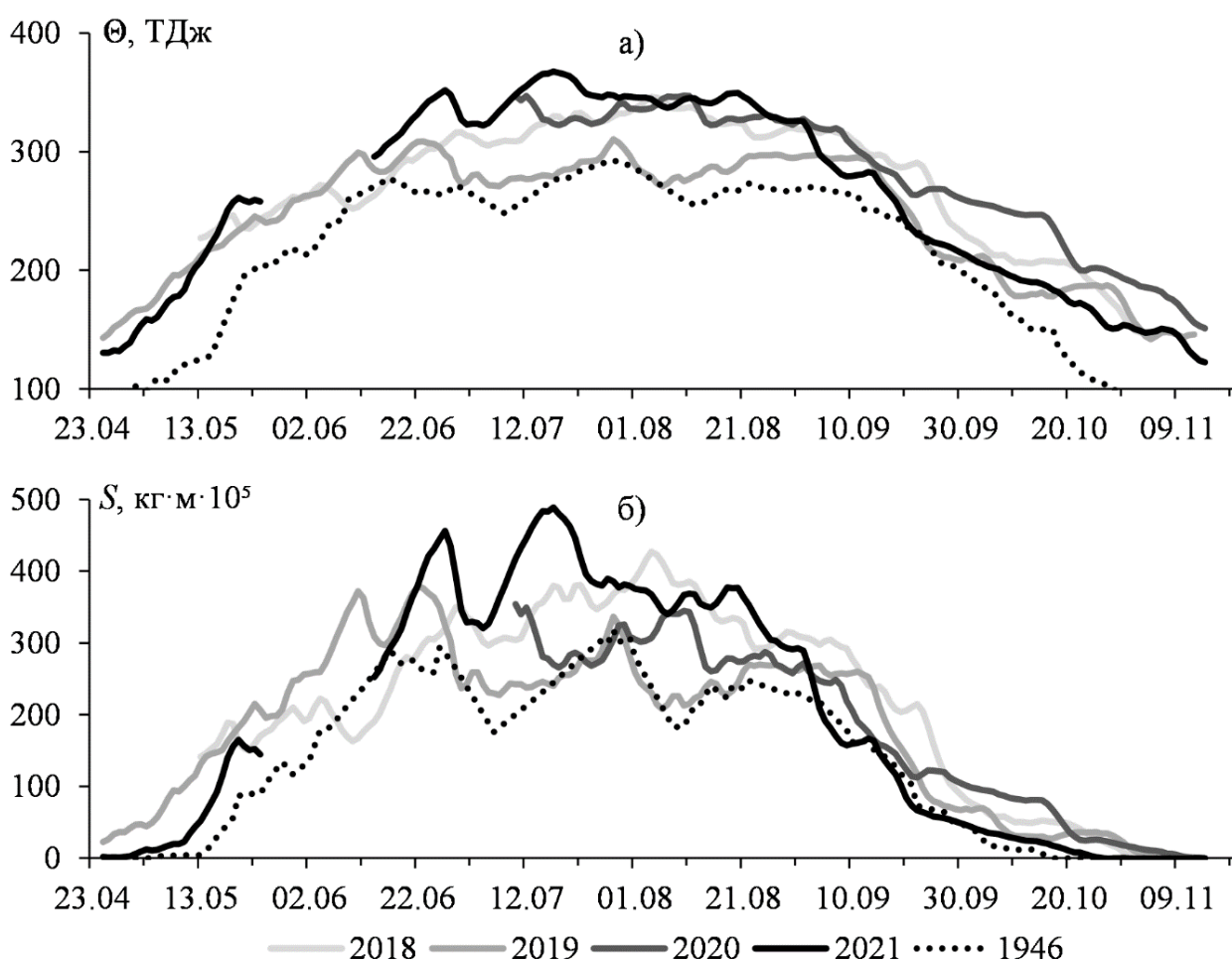
Самым низким за лето теплозапасом (рис. а) отличался 2019 г., что обусловлено не только менее прогретым эпилимнионом во вторую половину лета, но и сравнительно холодным гипolimнионом по сравнению с остальными годами. Наиболее устойчивый термоклин наблюдался в 2018 и 2021 гг., наименее устойчивый – в 2020 и 2019 гг. То же можно сказать и об устойчивости всей водной массы (рис. б). В 2021 г. она превышала $500\text{ кг}\cdot\text{м}\cdot 10^5$, в 2019 г. не достигала $400\text{ кг}\cdot\text{м}\cdot 10^5$.

Холодной и ветреной осенью 2021 г. разрушение летней стратификации началось раньше всего: эпилимнион остыл до 15°C к середине сентября, до 10°C – к началу октября. Теплой и безветренной осенью 2018 г. разрушение стратификации происходило позже всего: до 15°C эпилимнион охладился к концу сентября, до 10°C – к началу третьей декады октября. В 2020 г. охлаждение было самым длительным: переход через $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ произошел так же рано, как в 2019 и 2021 гг., а через $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – так же поздно, как в 2018 г.

По данным [1] в 1946 г. теплозапас и вертикальная устойчивость водной толщи озера Глубокого большую часть лета были существенно ниже, чем в годы

наших исследований (рисунок). Максимальные величины теплозапаса по данным исследований первой половины XX в. [5] различаются не более чем на 25%. За 2018-21 гг. разброс значений Θ составляет 16%. При этом в среднем современный максимальный годовой теплозапас оказывается на 16% выше, чем в первой половине XX века, а средняя температура – на 8% выше.

Не привлекая дополнительного материала, нельзя утверждать, что это повышение теплосодержания в летний период обусловлено исключительно климатическими изменениями. Другая возможная причина – значительное снижение цветности воды в озере и увеличение прозрачности после мелиоративных работ на заболоченном водосборе озера в 1960-х гг.



Изменения теплозапаса Θ , ТДж (а) и вертикальной устойчивости S , $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot 10^5$ (б) в озере Глубоком в теплый период 2018-2021 гг. и в 1946 г. (по [1])

Выводы

Проведенные детальные наблюдения за температурой воды озера Глубокого в 2018-2021 гг. позволили получить актуальные представления о его термодинамическом режиме. При сохранении всех черт, присущих озерам данной климатической зоны, современный режим озера по ряду количественных показателей отличается от наблюдавшегося в первой половине XX века.

Переход от весенней циркуляции к летней стратификации происходит на несколько недель раньше и в отдельные годы при меньшей устойчивости, чем указывается для прошлых лет.

Сезонный слой скачка формируется, как и прежде, на глубинах 2-4 м и в течение лета погружается до глубины 8-10 м, однако вертикальная устойчивость водной толщи оказывается выше. Также по сравнению с первой половиной XX века возросли максимальные величины теплозапаса и средней температуры воды в озере (в среднем на 16% и 8% соответственно). Температура придонных слоев гипolimниона при этом по-прежнему составляет 4-6°C; различия между соседними годами бывают существеннее, чем между прошлым и современным периодом.

Разрушение летней стратификации и переход к осенней гомотермии происходит, как и раньше, при температуре водной толщи, близкой к 6°C, однако почти на месяц позже. Таким образом, средняя длительность периода летней стратификации возросла не менее чем на 1-1,5 месяца.

Причиной увеличения теплосодержания и средней температуры озера могут быть как климатические изменения, так и увеличение прозрачности воды в результате мелиоративных работ на водосборе.

Работа выполнена в рамках НИР кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова (ГЗ № 121051400038-1).

Библиографический список

1. Богословский Б.Б. О термическом режиме озера Глубокого в безледный период / В кн. Вопросы географии. Сб. 26. Гидрология. М.: ГЕОГРАФИЗ, 1951. С. 96-117.
2. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белашев Б.З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953-2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. №2. С. 228-238.
3. Жукова Т.В., Радчинова Н.П., Адамович Б.В. и др. Температурный режим Нарочанских озер на фоне многолетних климатических изменений // Вестник БГУ. Серия 2. 2014. №2. С. 26-35.
4. Обязов В.А. Гидрологический режим озер Забайкалья в условиях меняющегося климата (на примере Ивано-Арахлейских озер) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. №3. С. 4-14.
5. Щербаков А.П. Озеро Глубокое. М.: Наука, 1967. 380 с.
6. Anderson E., Stow C., Gronewold A. et al. Seasonal overturn and stratification changes drive deep-water warming in one of Earth's largest lakes // Nature Commun. 2021. Vol. 12(1688). P. 1-9.
7. Fang X., Stefan H. Projections of climate change effects on water temperature characteristics of small lakes in the contiguous U.S. // Climatic Change. 1999. Vol. 42. P. 377-412.
8. Hondzo M., Stefan H.G. Regional water temperature characteristics of lakes subjected to climate change // Climatic Change. 1993. Vol. 24. Pp. 187-211.

9. Kirillin G. Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Boreal Env. Res.* 2010. Vol. 15. P. 279–293.
10. O'Reilly C., Sharma S., Gray D. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 10.773–10.781.
11. Öglü B., Möls T., Kaart T. et al. Parameterization of surface water temperature and long-term trends in Europe's fourth largest lake shows recent and rapid warming in winter // *Limnologia*. 2020. Vol. 82(125777).
12. Schindler D.W., Beaty K.G., Fee E.J. et al. Effects of climatic warming on lakes of the central boreal forest // *Science*. 1990. Vol. 250(4983). P. 967–970.
13. Trumpickas J., Shuter B., Minns C. Forecasting impacts of climate change on Great Lakes surface water temperatures // *J. Great Lakes Res.* 2009. Vol. 35. P. 454–463.
14. Winslow L., Read J., Hansen G. et al. Seasonality of change: summer warming rates do not fully represent effects of climate change on lake temperatures // *Limnol. Oceanogr.* 2017. Vol. 62. P. 2168–2178.

УДК 556.51: 556.5.06

З.А. Сучилина, Б.И. Гарцман, mezozya1@mail.ru
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ р.УССУРИ НА ОСНОВЕ ИМК ECOMAG

На основе ИМК ECOMAG и данных мезомасштабной модели климата WRF в работе исследуется возможность создания методики краткосрочного прогноза дождевых паводков в бассейне реки Уссури. Разработана и реализована схема прогноза, а также, получены оценки результатов по стандартным критериям качества.

Ключевые слова: река Уссури, дождевой паводок, краткосрочный прогноз, моделирование, расход, климатическая модель, калибровка.

Z.A. Suchilina, B.I. Gartsman, mezozya1@mail.ru
Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

SHORT-TERM FORECAST OF RAIN FLOODS IN THE USSURI RIVER BASIN BASED ON THE IMC ECOMAG

Based on the IMC ECOMAG and data from the meso-scale WRF climate model, this study researches the opportunity of creating methods of rain flood short-term forecasting in the Ussuri river