

УДК 556.555.5:556.556:556.072

**НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЭЛЕЯ – ТЭЙЛОРА КАК МЕХАНИЗМ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ОЗЕРЕ, ПОКРЫТОМ ЛЬДОМ****Голосов С.Д., Терзевик А.Ю., Зверев И.С., Здорovenнов Р.Э., Здорovenнова Г.Э., Богданов С.Р., Волков С.Ю., Гавриленко Г.Г., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И.***Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, e-mail: zdorovennova@gmail.com*

По данным измерений температуры и концентрации растворенного кислорода изучены особенности динамики придонного пограничного слоя небольшого озера Вендюрского (юг Карелии) в период ледостава. Наряду с сезонным ростом температуры, обусловленным теплообменом с донными отложениями, и уменьшением концентрации растворенного кислорода в процессе разложения органического вещества, определен широкий диапазон периодов колебаний изученных параметров в течение зимы. В спектрах температуры и кислорода присутствуют колебания с периодами от нескольких минут до нескольких часов, которые могут быть проявлением коротких внутренних волн и сейш. Колебания с периодом в несколько десятков часов по значениям спектральной плотности почти не уступают сезонным, но существенно превосходят остальные, что свидетельствует о том, что в придонном слое озера периодически реализуется эффективный механизм теплообмена. Эпизоды быстрых изменений температуры воды и концентрации растворенного кислорода в придонном слое озера происходят синхронно; частота их появления уменьшается в течение зимы. Установлено, что источник резких изменений параметров расположен в нескольких сантиметрах над поверхностью донных отложений. В качестве объяснения явления предложена гипотеза о возникновении неустойчивости Рэлея – Тейлора в придонном пограничном слое, неустойчивое распределение плотности в котором возникает в процессе бактериального разложения органического вещества. Волновое воздействие на границу раздела плотностей приводит к последующему перемешиванию придонного пограничного слоя. Результаты моделирования подтвердили возможность возникновения данного явления, приводящего к интенсификации тепло- и массообмена в озере между водной массой и донными отложениями.

**Ключевые слова:** бореальное озеро, период ледостава, температура воды, растворенный кислород, неустойчивость Рэлея – Тейлора, придонный пограничный слой

**RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY AS A MECHANISM OF HEAT AND MASS EXCHANGE IN ICE-COVERED LAKE****Golosov S.D., Terzhevik A.Yu., Zverev I.S., Zdorovennov R.E., Zdorovennova G.E., Bogdanov S.R., Volkov S.Yu., Gavrilenko G.G., Efremova T.V., Palshin N.I.***Northern Water Problems Institute Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, e-mail: zdorovennova@gmail.com*

Using observational data on water temperature and dissolved oxygen, seasonal dynamics of the near-bottom boundary layer in a small lake Vendyurskoe during the ice season is studied. Along with the seasonal increase of water temperature conditioned by heat exchange with bottom sediments, and a decrease of dissolved oxygen concentrations due to organic matter decomposition, a wide range of fluctuations is revealed. Time-frequency spectra calculated for both parameters demonstrate the presence of oscillations with a period from several minutes to several hours, which likely are caused by wave processes. Fluctuations of several tens of hours are comparable to seasonal fluctuations, but significantly exceed all others. This certifies the presence of the effective mechanism of heat and mass transfer within the near-bottom boundary layer. Fast changes in values of both parameters occur synchronically; frequency of their appearance decreases along the ice season. It has been found that the source of sharp changes in parameters studied is located in several centimeters above the water-sediment interface. To explain such a phenomenon, a hypothesis on the development of Rayleigh-Taylor instability in the near-bottom boundary layer, unstable distribution of water density of which develops due to bacterial destruction of organic matter, is proposed. Action of internal waves on the boundary between different densities leads to the follow-up mixing in the near-bottom boundary layer. Results of numerical modeling confirmed a capability of such phenomenon to be developed and its ability to intensify heat and mass transfer between water body and bottom sediment in ice-covered lakes.

**Keywords:** boreal lake, ice-covered period, water temperature, dissolved oxygen, Rayleigh-Taylor instability, bottom boundary layer

В мелководных озерах теплообмен через границу вода – дно оказывает влияние на термический и газовый режимы, скорости химико-биологических процессов в придонных слоях, способствует высвобождению питательных веществ и газов из верхнего слоя донных отложе-

ний (ДО) и т.п. [1–3]. Механизмы теплообмена в придонном пограничном слое (ППС) включают, наряду с молекулярной диффузией, биотурбацию, ресуспензию, поровую конвекцию [4, 5]. Интенсификация обмена на границе вода – дно в мелководных озерах происходит под

воздействием различных гидродинамических процессов, таких как ветро-волновое перемешивание, внутренние волны, сейши, склоновые течения [4, 5].

Верхний слой ДО мелководных озер часто представляет собой ил с большим содержанием воды, включениями органического вещества (ОВ), взвешенных частиц и т.п.; в такой среде с переменной по вертикали плотностью возможно возникновение так называемой неустойчивости Рэлея – Тейлора (НРТ) [6], которая может вносить вклад в интенсификацию тепло-массообменных процессов вблизи границы вода – дно. Феномен возникновения НРТ в придонных слоях озер, покрытых льдом, не изучен.

Цель исследования: изучить возможность возникновения неустойчивости Рэлея – Тейлора вблизи границы вода – дно в мелководном озере зимой, оценить ее роль в динамике температуры и растворенного кислорода (РК) в придонных слоях водоема.

#### Материалы и методы исследования

Длительные высокочастотные измерения температуры и содержания РК были проведены в небольшом бореальном озере Вендюрском (62°10'–62°20'N, 33°10'–33°20'E) в период с 17 октября 2009 г. по 17 июня 2010 г. Площадь озера 10,4 км<sup>2</sup>, средняя глубина 5,3, максимальная 13,4 м. Прозрачность воды по диску Секки 2,5–3,5 м. Донные отложения представляют собой песок на мелководье и коричневые илы в глубоководной части озера. Батиметрическая карта приведена в работе [7]. В центральной глубоководной части озера на глубине 11,1 м была установлена заякоренная коса, оснащенная датчиками температуры и РК фирмы RBR Ltd. (точность по температуре 0,002 °С, по кислороду ±1 %, диапазон 0–150 %). Датчики были закреплены на расстоянии от границы вода – дно 0,08; 0,10; 0,12; 0,14; 0,16; 0,66; 1,80; 2,87; 3,87; 4,87; 5,84; 6,87; 7,90; 8,87 м. Рядом с косой на дно озера была установлена придонная платформа, оснащенная 10 температурными датчиками RBR Ltd. со сдвигом по вертикали в 2 см так, что часть из них находилась в верхнем слое ДО, часть – в придонном слое воды. Интервал измерений составлял одну минуту.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных косы позволил выявить широкий спектр изменчивости температу-

ры воды и РК в озере зимой [7]. В спектрах температуры и РК преобладают сезонные, суточные и полусуточные колебания, выделяются также колебания с периодами от нескольких десятков часов до нескольких минут. Сезонный ход температуры обусловлен ее повышением вследствие поступления тепла от ДО [7], а уменьшение РК в течение зимы связано с его поглощением при бактериальном разложении ОВ [8]. Колебания от нескольких часов до нескольких минут определяются волновыми процессами [9]. Например, периоды в 25 и 6 мин (рис. 1, б) соответствуют периодам первой моды продольной и поперечной сейш оз. Вендюрского.

Колебания с периодом несколько десятков часов по значениям спектральной плотности почти не уступают сезонным, но существенно превосходят остальные, что свидетельствует о том, что в ППС периодически реализуется эффективный механизм теплообмена, вызывающий значительные изменения в температуре и РК и не имеющий объяснения с точки зрения сезонных колебаний и волновых процессов. Флуктуации температуры и РК представляют собой практически мгновенное (в пределах нескольких минут) резкое падение температуры воды и резкий рост РК (рис. 1, а). Например, 11 декабря 2009 г. в 16:41 температура воды на нижнем датчике косы (расстояние от дна 8 см) составляла 2,16 °С, концентрация РК 0,65 мгО<sub>2</sub>/л. Затем в течение 11 мин температура быстро уменьшилась до 1,28 °С, концентрация РК при этом резко увеличилась до 8,40 мгО<sub>2</sub>/л. Затем в течение примерно 45 ч происходило плавное возвращение параметров до исходных значений, и в 13:01 13 декабря произошло очередное резкое изменение температуры и РК. Флуктуации обоих параметров происходят синхронно, что позволяет заключить, что причины их общие, а источник может быть локализован в одном и том же месте.

Для того чтобы определить пространственное положение источника описанных выше колебаний температуры воды и концентрации РК в ППС, был проанализирован характер распространения температурных возмущений в момент реализации исследуемого механизма. На рис. 2 результаты совместного анализа данных с косы и платформы представлены в терминах времени запаздывания распространения теплового возмущения на различном расстоянии от границы вода – дно.

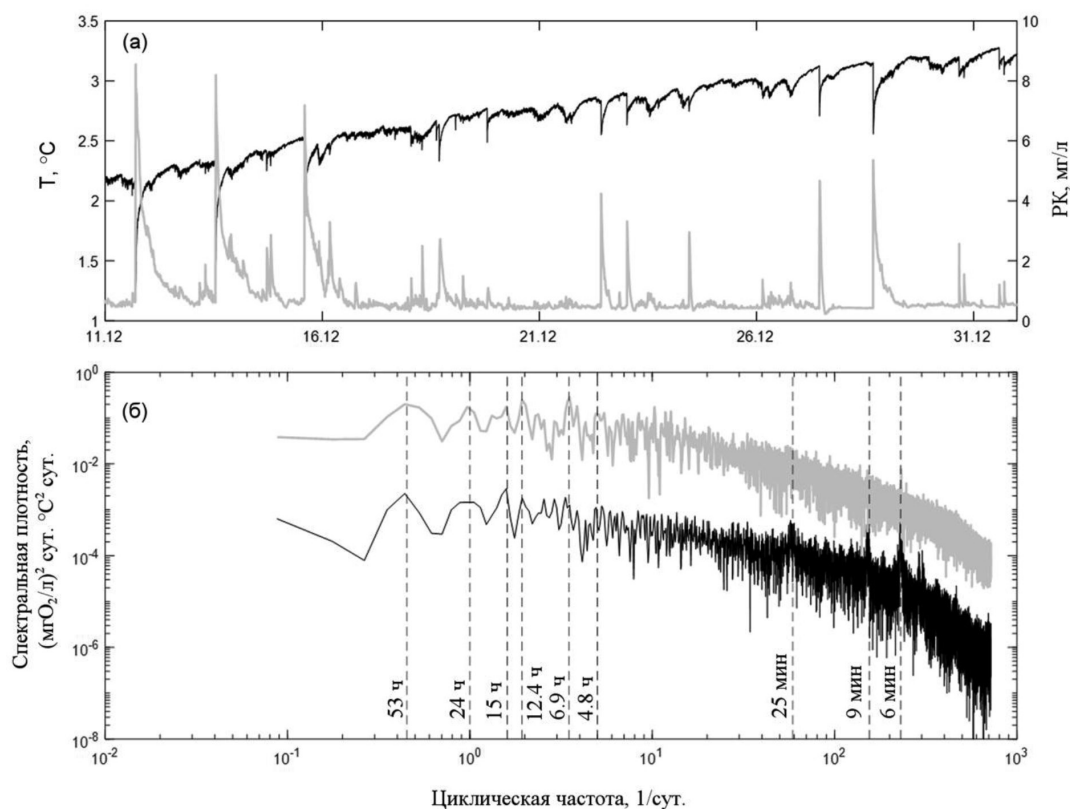


Рис. 1. Изменчивость температуры и концентраций РК (а) и соответствующие спектры колебаний этих параметров (б) в придонном слое оз. Вендюрского в период с 11 по 31 декабря 2009 г. Расстояние датчиков от границы вода – дно 8 см. Серая линия – концентрация РК, мгО<sub>2</sub>/л, черная линия – температура, °С. Штриховые линии показывают преобладающие периоды колебаний параметров

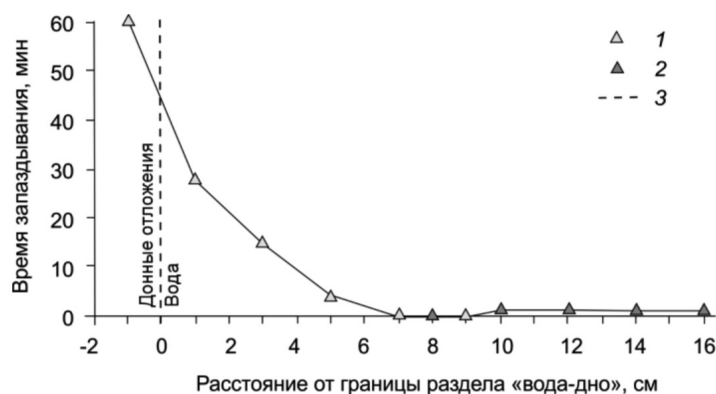


Рис. 2. Время запаздывания распространения теплового возмущения в зависимости от расстояния от поверхности раздела вода – дно по данным косы и придонной платформы. 1 и 2 – датчики косы и платформы соответственно, 3 – граница вода – ДО

Из данных рис. 2 следует, что источник тепловых возмущений располагается на расстоянии 7–9 см над поверхностью дна (время запаздывания 0 мин). По мере приближения к поверхности ДО время запаздывания

резко возрастает. И, наоборот, на расстояние до 16 см над дном тепловой сигнал распространяется практически мгновенно – время запаздывания составляет всего одну минуту. Это свидетельствует о том, что в сторону

ДО возмущение распространяется механизмами, близкими по эффективности к молекулярным, а в обратном направлении – намного более эффективным турбулентным перемешиванием. Таким образом, можно утверждать, что источник рассматриваемого механизма находится в 7–9 см над поверхностью ДО. Следовательно, на этой глубине находится – или образуется с периодичностью в десятки часов – источник дополнительной плавучести, который придает придонной воде положительную по отношению к вышележащим слоям плавучесть, что приводит к последующему перемешиванию ППС.

Источником дополнительной плавучести в ППС может быть любая неконсервативная примесь, сосредоточенная непосредственно у поверхности ДО и подверженная трансформации, сопровождающейся уменьшением плотности. В озерных условиях такой примесью может быть ОВ, которое накапливается за период открытой воды в придонном слое. В результате окислительно-восстановительных реакций на границе вода – дно происходит сорбция, растворение и переотложение продуктов химических реакций, активный массообмен между верхним слоем ДО и прилегающим слоем воды [10–13]. Оседающее на дно ОВ имеет большую, по сравнению с окружающей средой, плотность. Поэтому оно естественным образом локализуется в придонном слое, превращая придонную воду в водный раствор с переменной по вертикали плотностью. ОВ в процессе бактериальной деструкции интенсивно разлагается в присутствии кислорода до углекислого газа и воды; процесс идет с потреблением РК [10–13].

Аккумулированное в придонной области ОВ играет роль своеобразной «солености», но при этом разлагается со скоростью потребления РК. Возможное уменьшение плотности придонного слоя за счет разложения ОВ можно оценить, используя уравнение состояния воды, учитывающее влияние температуры и солености [14]. На рис. 3 представлены результаты расчета изменения плотности воды с использованием уравнения состояния воды Чена – Миллера [14], в котором роль солености выполняет концентрация ОВ. Из расчетных данных, представленных на рис. 3, видно, что через 18 ч после начала расчетов в придонном слое развивается плотностная неустойчивость, т.е. плотность раствора на расстоянии 8 см над дном

становится меньше, чем плотность вышележащего слоя. Именно такого рода плотностная неустойчивость является предпосылкой для реализации механизма НРТ, стадии развития которого представлены на рис. 4. На первой стадии в результате разложения ОВ возникает ситуация, когда более плотная вода (плотность  $\rho_1$ ) находится над менее плотной (плотность  $\rho_2$ ), то есть создается неустойчивое равновесие. Из-за того, что перепад плотности мал, данная неустойчивость в спокойном состоянии необязательно приводит к перемешиванию. Однако достаточно даже малого воздействия на границу раздела плотностей (в нашем случае это может быть любое волновое воздействие (стадия 2)) для того, чтобы механизм пришел в действие. В случае возмущения границы раздела более плотная вода приобретает дополнительный импульс и под действием силы тяжести начинает двигаться вниз, вытесняя при этом менее плотную воду в обратном направлении (стадия 3), что вызывает турбулентное перемешивание ППС (стадия 4). Применительно к конкретному рассматриваемому случаю это приводит к формированию придонного квазиоднородного слоя с пониженной температурой воды и повышенной концентрацией РК. Как показывают данные натурных измерений, в течение нескольких десятков часов стратификация придонного слоя по температуре и РК восстанавливается.

Для оценки возможности возникновения НРТ в озере была разработана математическая модель реализации механизма НРТ в озере в подледный период. При моделировании в качестве базовой использовалась математическая модель FLakeEco, описывающая сезонные изменения температуры воды и РК в озере [15]. Модель была модифицирована с целью возможности учета переменной солености в уравнении состояния воды. По модифицированной модели был выполнен ряд расчетов с целью воспроизведения реализации механизма НРТ в ППС, а также для оценки влияния данного механизма на обмен теплом и РК в ППС. На рис. 5 представлены результаты моделирования. Там же для сравнения приведены данные натурных наблюдений.

Сравнение расчетных и измеренных значений температуры и РК показало, что модель адекватно описывает возникновение НРТ и вызываемое ею перемешивание в ППС. При этом абсолютные значения скачков температуры и концентрации РК хорошо

согласуются с данными наблюдений. Наблюдаемый разброс в расчетном и наблюдаемом времени реализации НРТ обусловлен, скорее всего, неопределенностью скорости протекания химико-биологических процессов в ППС озера. Действительно, трудно предположить, что скорость деструкции ОВ, от которой зависит возникновение НРТ, является постоянной во времени.

Возникновение НТР в придонных слоях покрытых льдом озер не носит детерминированный характер, что обуславливает сложность его изучения. Видеозапись микроперемещений водных масс в придонных слоях озер, синхронная с измерениями температуры воды и концентрации РК, могла бы послужить хорошей иллюстрацией феномена НРТ. Однако применение метода видеосъемки [4] крайне затруднительно в природных условиях водоема с низкой прозрачностью в зимний период. Коллектив авторов, к сожалению, не располагает необходимым оборудованием для исследований

оптических неоднородностей среды, вызываемых конвективными процессами.

### Заключение

В ходе исследований были проанализированы натурные данные о временной изменчивости температуры и концентрации РК в ППС небольшого мелководного озера в зимний период. Выявлены основные временные масштабы изменчивости температуры воды и концентраций РК в ППС озера, покрытого льдом. Механизмом, играющим значимую роль в формировании динамики ППС с соответствующими колебаниями температуры воды и концентрации РК, может являться неустойчивость Рэлея – Тэйлора (НРТ), возникающая под воздействием химико-биологических процессов вблизи границы раздела вода – дно. Механизм НРТ при реализации обеспечивает эффективную доставку РК из вышележащих слоев к непосредственной границе раздела между водной массой и донными отложениями.

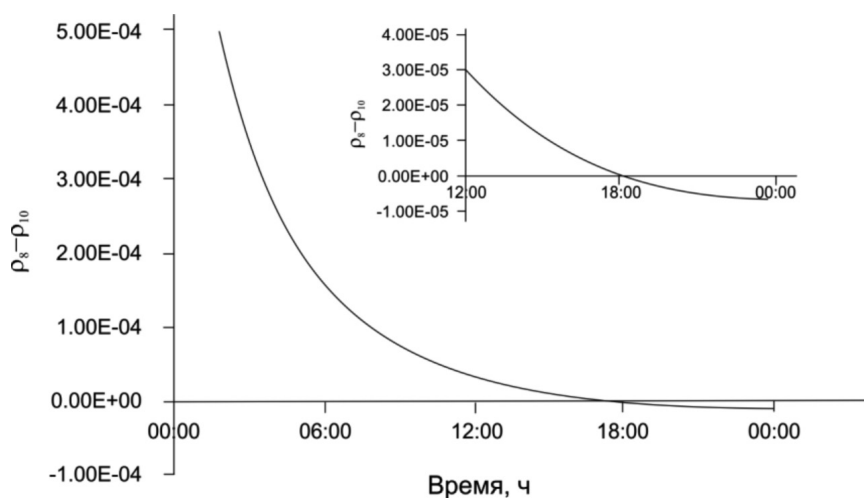


Рис. 3. Разность плотностей в слое между 8 и 10 см над поверхностью дна 11.12.2009 г. На врезке – детализированное изображение перехода разности плотностей через ноль

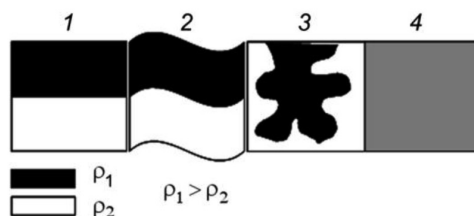


Рис. 4. Схема последовательных стадий реализации неустойчивости Рэлея – Тэйлора (НРТ) в придонном слое. 1 – возникновение неустойчивого равновесия; 2 – возмущение границы раздела плотностей; 3 – опускание «тяжелой» жидкости с вытеснением менее плотной; 4 – выравнивание плотностей за счет турбулентного перемешивания

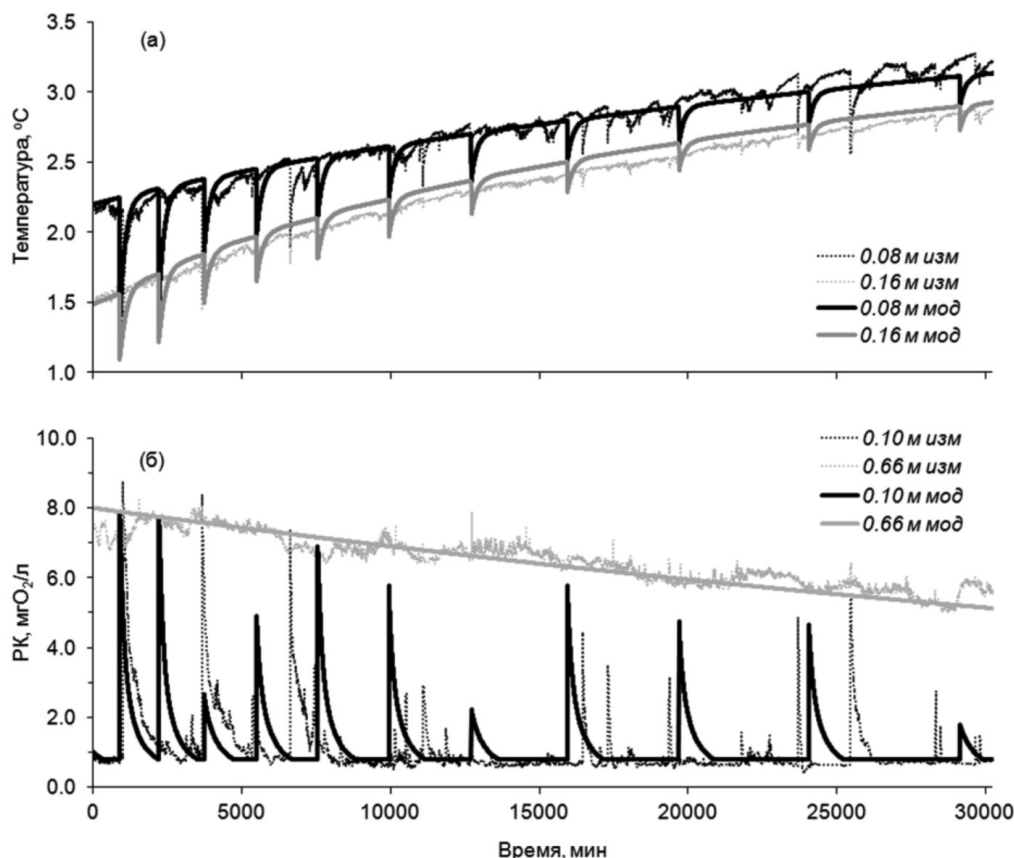


Рис. 5. Влияние механизма НРТ на временную изменчивость температуры (а) и концентрации РК (б), отражающих интенсивность теплообмена в ППС, в период с 11 по 31 декабря 2009 г. (по оси ординат время указано в минутах с 00:00 11.12.2009). Тонкие линии – измеренные значения, толстые – результаты модельного расчета

При этом за счет поддержания высокого градиента в концентрации РК между придонной и поступающей за счет перемешивания водой обеспечивается его ускоренное бактериальное потребление при разрушении ОВ в придонном слое воды и верхнем слое донных отложений. Разработана математическая модель механизма НРТ, которая может быть использована для оценки бюджетов тепла и РК в озере в подледный период, а также при изучении массообменных процессов в ППС, таких, например, как поступление биогенных элементов из донных отложений в воду.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук».

#### Список литературы / References

1. Anschutz P., Ciutat A., Lecroart P., Gérino M., Boudou A. Effects of tubificid worm bioturbation on freshwater

sediment biogeochemistry. *Aquatic Geochemistry*. 2012. V. 18. P. 475–497.

2. Golosov S.D., Ignateva N.V. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment-water interface in shallow lake. *Hydrobiologia*. 1999. V. 408/409. P. 153–157. DOI: 10.1023/a:1017067532346.

3. Deemer B.R., Henderson S.M., Harrison J.A. Chemical mixing in the bottom boundary layer of a eutrophic reservoir: The effects of internal seiche on nitrogen dynamics. *Limnology and Oceanography*. 2015. V. 60 (5). P. 1642–1655. DOI: 10.1002/lno.10125.

4. Bernhardt J., Kirillin G., Hupfer M. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations. *Limnol. Oceanogr. Fluids & Environments*. 2014. V. 4 (1). P. 17–33. DOI: 10.1215/21573689-2683238.

5. Gautreau E., Volatier L., Nogaro G. et al. The influence of bioturbation and water column oxygenation on nutrient recycling in reservoir sediments. *Hydrobiologia*. 2020. V. 847. P. 1027–1040. DOI: 10.1007/s10750-019-04166-0.

6. Chandrasekhar S. *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*. Dover Publications, Inc. New York, 1981. 652 p.

7. Здорвеннов Р.Э., Здорвеннова Г.Э., Пальшин Н.И., Терзевик А.Ю. Изменчивость термического и кислородного режимов мелководного озера зимой // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 57–63.

Zdorovennov R.E., Zdorovennova G.E., Palshin N.I., Terzhevik A.Yu. Variability of thermal and oxygen regimes of

a shallow lake in winter // Trudy KarNTS RAN. 2011. No. 4. P. 57–63 (in Russian).

8. Терзhevik А.Ю., Пальшин Н.И., Голосов С.Д., Здорovenнов Р.Э., Здорovenнова Г.Э., Митрохов А.В., Потакhin М.С., Шипунова Е.А., Зверев И.С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 5. С. 568–579.

Terzhevik A.Yu., Palshin N.I., Golosov S.D., Zdorovennov R.E., Zdorovennova G.E., Mitrokhov A.V., Potakhin M.S., Shipunova E.A., Zverev I.S. Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake. *Water Resources*. 2010. Vol. 37 (5). P. 662–673.

9. Palshin N.I., Bogdanov S.R., Zdorovennova G.E., Zdorovennov R.E., Efremova T.V., Belashev B.Z., Terzhevik A. Yu. Short Internal Waves in a Small Ice-Covered Lake. *Water Resources*. 2018. Vol. 45 (5). P. 695–705. DOI: 10.1134/S0097807818050159.

10. Li Hui, Song Chun-Lei, Cao Xiu-Yun, Zhou Yi-Yong. The phosphorus release pathways and their mechanisms driven by organic carbon and nitrogen in sediments of eutrophic shallow lakes. *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 572. P. 280–288.

11. Белкина Н.А., Субетто Д.А., Ефременко Н.А., Кулик Н.В. Особенности распределения микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Наука и образование. 2016. № 3 (83). С. 135–139.

Belkina N.A., Subetto D.A., Efremenko N.A., Kulik N.V. Features of the distribution of trace elements in the surface layer of bottom sediments of Lake Onega // *Nauka i obrazovanie*. 2016. No. 3 (83). P. 135–139 (in Russian).

12. Белкина Н.А. Особенности процесса трансформации органического вещества в донных отложениях озер Карелии и его влияние на химический состав придонных вод // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. № 5 (15). Вып. 4. С. 263–276.

Belkina N.A. Features of the process of transformation of organic matter in bottom sediments of lakes in Karelia and its effect on the chemical composition of bottom waters // *Геополитика i ekogeodinamika regionov*. 2019. № 5 (15). Вып. 4. P. 263–276 (in Russian).

13. Hofmann A.M., Geist J., Nowotny L. et al. Depth-distribution of lake benthic diatom assemblages in relation to light availability and substrate: implications for paleolimnological studies. *J. Paleolimnol.* 2020. V. 64. P. 315–334. DOI: 10.1007/s10933-020-00139-9.

14. Chen C.A., Millero F.J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range. *Limnol. Oceanogr.* 1986. V. 31 (3). P. 657–662.

15. Golosov S., Maher O., Schipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes. *Oecologia*. 2007. V. 151 (2). P. 331–340.