

УДК 556.556 : 551.511.6

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВОДНОЙ МАССЫ НЕБОЛЬШОГО ОЗЕРА ПРИ НОЧНОМ ВЫХОЛАЖИВАНИИ

С. Р. Богданов^{1*}, Г. Э. Здоровеннова¹, Р. Э. Здоровеннов¹,
И. А. Максимов², Н. И. Пальшин¹

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),

*Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ул. Красноказарменная, 14,
стр. 1, Москва, Россия, 111250)

Приводятся результаты изучения режима перемешивания небольшого по площади озера, ветровое воздействие на водную толщу которого существенно ослаблено залесенностью прилегающей береговой территории. Измерения температуры с помощью цепочки термисторов осуществлялись в период открытой воды в течение двух сезонов, в 2021 и 2023 гг. Основное внимание было уделено периодам ночного поверхностного выхолаживания, поскольку именно этот механизм можно считать преобладающим в перемешивании водной массы и образовании конвективно-перемешанного поверхностного слоя на этапе летнего нагревания. При этом, несмотря на значительные ночные потоки тепла на поверхности, полного перемешивания не происходит. Анализ динамики температурного профиля и расчет эффективности перемешивания осуществлен с помощью интегрального энергетического метода, на основе выделения эпизодов перемешивания и расчетов базовой потенциальной энергии и потока плавучести. Для эффективности перемешивания по двум сезонам получены оценки 0,45 и 0,49, существенно превышающие каноническое значение 0,17. Обнаружено также, что значение эффективности зависит от толщины перемешанного слоя.

Ключевые слова: малое озеро; поверхностное выхолаживание; базовая потенциальная энергия; поток плавучести; эффективность перемешивания

Для цитирования: Богданов С. Р., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Максимов И. А., Пальшин Н. И. Особенности перемешивания водной массы небольшого озера при ночном выхолаживании // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 25–38. doi: 10.17076/lim1874

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН).

**S. R. Bogdanov^{1*}, G. E. Zdorovenova¹, R. E. Zdorovenov¹, I. A. Maksimov²,
N. I. Palshin¹. FEATURES OF MIXING THE WATER MASS OF A SMALL LAKE
DURING NIGHT COOLING**

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

² National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14-1 Krasnokazarmennaya St.,
111250 Moscow, Russia)

The article presents the results of a study of the mixing regime of a small lake, the wind effect on the water column of which is significantly weakened by the forest cover of the adjacent coastal area. Temperature measurements using a chain of thermistors were carried out during two open seasons, in 2021 and 2023. The main attention was paid to periods of night cooling, since it is this mechanism that can be considered prevalent in the mixing of the water column and the formation of a convectively mixed surface layer. Wherein, in the summer months, despite significant nighttime heat fluxes on the surface, complete mixing does not occur. The analysis of the dynamics of the temperature profile and the calculation of the efficiency of mixing were carried out using the integral energy method, based on the identification of mixing episodes and calculations of the background potential energy and buoyancy flux. For mixing efficiency, estimates of 0.45 and 0.49 were obtained for two seasons, significantly exceeding the canonical value of 0.17. It was also revealed that the efficiency value depends on the shape of the density profile and, in particular, on the thickness of the mixed layer.

Keywords: small lake; surface cooling; background potential energy; buoyancy flux; mixing efficiency

For citation: Bogdanov S. R., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Maksimov I. A., Palshin N. I. Features of mixing the water mass of a small lake during night cooling. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 2. P. 25–38. doi: 10.17076/lim1874

Funding. The article was prepared using federal budget funding under state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

**Введение. Литературный обзор
и постановка задачи**

Закономерности формирования и тренды в изменениях режима перемешивания озер остаются приоритетными задачами лимнологии, особенно в условиях климатических изменений и усиления антропогенного воздействия на водные объекты. Эти закономерности во многом определяют параметры важнейших экологических процессов, например газообмена (прежде всего таких активных газов, как CO₂ и CH₄) через водную поверхность [Read et al., 2012]. Особенности режима перемешивания озер играют также большую роль в изучении глобальных процессов, например, углеродного цикла [Cole et al., 2007].

Основу количественного описания режима перемешивания составляет изучение особенностей турбулентного теплопереноса в водной толще. При этом турбулентность возникает как результат различных внешних воздействий, среди которых наиболее важны механическое (ветровое) перемешивание, а также

радиационные факторы, связанные с неоднородным нагревом или охлаждением. При этом, как известно, лишь часть внешней нагрузки энергии затрачивается собственно на перемешивание, перестройку температурного и плотностного профилей; остальная часть энергии диссипируется в тепло. Отношение этих энергий – коэффициент перемешивания Γ – играет ключевую роль в изучении различных механизмов перемешивания, как и смежный с ним параметр $\eta = \Gamma / (1 + \Gamma)$ – эффективность перемешивания.

В ряде ранних работ, основанных на анализе океанологических данных, сформулировано предположение о постоянном, универсальном значении этого параметра и предложена оценка $\Gamma \sim 0,20$ (см. обзор в [Gregg et al., 2018]). Однако исследования последних лет [Bluteau et al., 2013; Maffioli et al., 2016] свидетельствуют о том, что величины Γ и η не являются константами, эффективность перемешивания существенно зависит как от параметров турбулентности, вызывающей перемешивание [Maffioli et al., 2016], так и от состояния

водоема непосредственно перед эпизодом перемешивания [Davies Wykes et al., 2015; Solserova et al., 2019]. Вывод выражений, конкретизирующих вариативность Γ , представляет собой, однако, весьма сложную задачу. В частности, такие исследования затруднены тем, что, как правило, перемешивание происходит под одновременным воздействием нескольких механизмов, и алгоритмы разделения вкладов каждого из них находятся лишь в стадии предварительной разработки [Read et al., 2012].

Косвенным индикатором сложностей изучения перемешивания служат также известные проблемы классификации озер по параметрам режима перемешивания. При этом в отличие от крупных озер вопросы, связанные с классификацией малых и мелких озер и прудов (обычно определяемых по условной границе площади зеркала – 5 гектаров) по особенностям их термического цикла и режимов перемешивания, во многом остаются открытыми [Kirillin, Shatwell, 2016]. В частности, в работе [Holgerson et al., 2022] показано, что для малых озер и прудов режим перемешивания весьма чувствителен по отношению даже к малым изменениям площади и глубины H . Между тем актуальность и значимость подобных вопросов в последние годы все более возрастает, в частности, в связи с предполагаемым усилением эмиссии (эвазии) метана от мелких озер и прудов арктической зоны в условиях потепления климата [Negandhi et al., 2013; Rehder et al., 2023].

Методы, используемые для количественного описания перемешивания в озерах, весьма разнообразны; различают, например, локальные и интегральные, динамические и энергетические. При этом, однако, их имплементация все еще сопряжена с рядом нерешенных теоретических проблем или с ограничениями, связанными с доступностью экспериментальных данных. Количественные оценки, получаемые при использовании различных методов, существенно (иногда на порядок и более [Bluteau et al., 2013]) отличаются. В этой связи в задачах классификации малых озер часто применяются и сугубо эмпирические подходы, основанные на статистической обработке опытных данных. Здесь, в свою очередь, возникают проблемы, связанные, например, с аморфностью параметров, используемых при постановке задач, с оценкой основных драйверов перемешивания и разделением их вкладов. Так, статус водоема нередко определяют по частоте его пребывания в перемешанном состоянии, с использованием весьма размытых качественных критериев: «редко», «часто», «эпизодически».

При этом для идентификации перемешанного состояния в качестве основного критерия часто используются достаточно условные пороговые значения градиентов плотности, и эти значения выбираются из достаточно широкого интервала (например, 0,032–0,287 (кг/м³)/м в работе [Holgerson et al., 2022]).

В настоящей работе представлен анализ режима перемешивания малого озера, основанный на применении интегрального энергетического метода. Его основное преимущество заключается в том, что для количественных оценок перемешивания используется так называемая базовая потенциальная энергия, изменение которой является прямым индикатором перестройки профиля плотности. Подробно рассмотрен лишь радиационный механизм перемешивания, обусловленный ночным выхолаживанием в летнее время. Основная задача заключалась в оценке эффективности η перемешивания. При этом интерес представляла не только сама величина η и ее возможные вариации под действием внешних параметров, но и, в контексте задач классификации малых озер, предполагаемая зависимость η от начального профиля температуры.

Описание объекта и методов

Объект исследования – небольшая лесная ламба Голубая (62° 15' с. ш. 33° 15' в. д.), расположенная на водосборе р. Суны, впадающей в Онежское озеро. Ламба не имеет притоков, питание осуществляется за счет атмосферных осадков, благодаря чему вода ламбы характеризуется высокой прозрачностью. Эта особенность обуславливает радиационное воздействие на весь столб воды до дна.

Формально по площади зеркала (0,039 км²) Голубая ламба может быть отнесена к пруду, однако при максимальной глубине 8 м, в рамках предложенной в [Holgerson et al., 2022] классификации, этот объект следует относить к классу димиктических/мономиктических водоемов. Длительные измерения температуры воды на автономной станции в центре озера с октября 2020 г. по октябрь 2023 г. подтверждают этот вывод: ламба представляет собой типичный димиктический водоем, с двумя периодами полного перемешивания весной после схода льда и осенью. Стратификация водной толщи устанавливается вскоре после взлома льда в мае и существует до сентября.

В данной работе проанализированы измерения на термокесе, проведенные с 19 июня по 25 октября 2021 г. и с 7 июня по 11 октября 2023 г. Дискретность измерений составляла

одну минуту. Данные за период открытой воды 2022 г. проанализированы в статье [Богданов и др., 2023]. В 2021 г. коса с датчиками крепилась к якорю и плавающему бую, который при установке был заглублен в воду для уменьшения влияния ветрового волнения на положение приборов. Семь температурных датчиков (TR-1060 RBR Ltd, точность 0,005 °C) размещались в верхнем слое от 0,69 до 3 м через 33 см, а остальные датчики – на глубинах 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 6,5 м. При установке косы на длительный период необходимо принимать во внимание, что уже в июле конвективно-перемешанный слой (КПС) может периодически заглубляться до 4–5 м, а к концу августа – до самого дна. Поэтому в 2023 г. 14 датчиков были установлены через 0,5 м, а верхний из них – на глубине 0,25 м.

При обработке опытных данных вначале провели предварительную оценку интенсивности внешних воздействий. Для сопоставления вкладов основных драйверов перемешивания – ветрового воздействия и поверхностного выхолаживания – выполнили расчет характерных значений сдвиговой u^* и конвективной w^* скоростей. При этом оценка величины u^* осуществлялась по известным значениям скорости ветра, с учетом коэффициента ослабления (sheltering), определяемого такими факторами, как береговой склон и лес на прилегающей к ламбе территории [Read et al., 2012]. Было установлено, что указанные факторы обеспечивают эффективное естественное укрытие Голубой ламбы от ветрового воздействия, существенно ослабляют адвекцию и, соответственно, значение величины u^* , поэтому при анализе перемешивания ветровой механизм не принимался во внимание.

Определенный вклад в перемешивание могут вносить процессы взаимодействия и разрушения внутренних волн. Кроме того, на оценки энергетических параметров, осуществленные в работе [Bouffard, Wüest, 2019] в рамках одномерной модели, могут оказывать влияние сейшевые колебания. Такие оценки, однако, проводились с использованием скользящих 2-часовых средних. Такой период усреднения существенно превышает периоды волновых процессов в Голубой ламбе, так что 1D-оценки представляются приемлемыми.

Таким образом, в качестве единственного механизма перемешивания рассматривался процесс поверхностного выхолаживания. При таком механизме при температуре воды выше 4 °C возникающая при охлаждении неустойчивость приповерхностного слоя приводит к генерации доступной потенциальной энергии APE и возникновению движения жидкости.

Суть же количественного рассмотрения сводится к изучению энергетического баланса, точнее, характера распределения «накачки» между «резервуарами» потенциальной и кинетической энергии. Ключевую роль при этом играет базовая потенциальная энергия BPE, определяемая как потенциальная энергия водного столба после виртуальной процедуры адиабатного перераспределения его слоев к состоянию механического равновесия. Именно изменение BPE, как показано в [Winters et al., 1995], служит прямой количественной оценкой энергии, расходуемой собственно на перемешивание. При использовании интегрального энергетического подхода анализируются эпизоды перемешивания, при этом в начальном и конечном состояниях кинетическая энергия и доступная потенциальная равны нулю, и BPE можно отождествить с обычной потенциальной энергией и рассчитать непосредственно по начальному и конечному равновесным профилям.

Оценки эффективности η в рамках энергетического подхода для каждого эпизода перемешивания осуществляются на основе независимого расчета трех базовых энергетических параметров: накачки энергии ΔE , ее вязкой диссипации ΔIE и прироста ΔBPE базовой потенциальной энергии:

$$\eta = \frac{\Delta BPE}{\Delta E} = \frac{\Delta BPE}{\Delta IE + \Delta BPE}. \quad (1)$$

Согласно (1) величина η представляет собой ту долю внешней энергетической накачки, которая расходуется собственно на перемешивание и индикатором которой является рост BPE.

Дальнейшее последовательное рассмотрение энергетических параметров проводится в рамках одномерного приближения, когда параметры считаются однородными по горизонтали. Предполагается, что крупномасштабное движение отсутствует и горизонтальной адвекцией можно пренебречь, в отличие от озер с обширными мелководными литоральными зонами [Doda et al., 2024].

Что касается накачки, ее скорость отождествлялась со скоростью генерации J_{APE} доступной потенциальной энергии (APE) (или, эквивалентно, поверхностный поток плавучести); эта величина может быть рассчитана непосредственно по поверхностному потоку тепла W_0 [Guseva et al., 2021]:

$$J_{APE} = (\alpha g H / 2c) W_0, \quad (2)$$

где α – коэффициент термического расширения, c – удельная теплоемкость, g – ускорение свободного падения. В связи с формулой (2) следует обратить внимание на абсолютные

значения потоков J_{APE} и W_0 ; связывающий их безразмерный параметр $\alpha g H / c$ весьма мал, его значение составляет по порядку 10^{-6} при характерных значениях $H \sim 10$ м и $\alpha \sim 10^{-4}$. Это означает, что лишь весьма малая часть потока энергии на верхней границе идет на генерацию потенциальной энергии и играет роль в процессе перемешивания [Guseva et al., 2021], что во многом обуславливает трудности изучения энергетического баланса, связанного с процессом перемешивания.

В общем случае расчет величины J_{APE} по формуле (2) осложняется тем, что для непосредственной оценки величины W_0 необходимо провести целый комплекс высокоточных измерений, позволяющий оценить все компоненты энергетического баланса: длинноволновую радиацию, теплопроводность, латентный перенос тепла. В данной работе при вычислении W_0 использовался альтернативный вариант, основанный на рассмотрении интегрального теплового баланса водной толщи и изменений теплозапаса столба воды за определенные промежутки времени. В случае, когда придонные потоки тепла малы, этот баланс можно представить в виде:

$$cm \frac{d\bar{T}}{dt} = -W_0. \quad (3)$$

Или, эквивалентно: $H \frac{d\bar{T}}{dt} = -I_0$. Здесь \bar{T} – средняя температура водной толщи, $I_0 = W_0 / (c\rho)$ – кинематический поток тепла, К м/с.

Расчет базовой потенциальной энергии проводился для каждого момента времени после процедуры перераспределения профилей (reordering) непосредственно по формуле:

$$E_b = \int_0^{H(t)} \rho'(z, t) z dz, \quad (4)$$

где $\rho' = \rho - \bar{\rho}$. Значения плотности рассчитывались с использованием лимнологической версии уравнения состояния Чена – Миллеро [Chen, Millero, 1986].

При расчете потенциальной энергии по формуле (4) исключается тот прирост потенциальной энергии в конечном состоянии, который обусловлен охлаждением слоя в целом и, соответственно, увеличением средней по столбу плотности $\bar{\rho}$. Подробнее этот вопрос представлен в работе [Богданов и др., 2023].

Вычисление третьего энергетического параметра – вязкой диссипации – осуществлялось на основе оценок поверхностного потока плавучести $B_s = \alpha g W_0 / (c\rho_0)$, Вт/кг. При этом использовалось приближенное представление профиля плотности: верхняя часть водного столба (КПС) толщиной h_{mix} считалась полностью перемешанной, нижняя – линейно стратифицированной.

В рамках такого приближения поток плавучести изменяется в КПС практически линейно [Deardorff, 1970], так что его среднее значение в пределах перемешанного слоя составляет $B_s/2$. Соответственно, для скорости генерации J_{TKE} (Вт/м²) кинетической энергии во всем КПС получаем соотношение [Jonas et al., 2003]:

$$J^{TKE} = (\alpha g h_{mix} / 2c) W_0. \quad (5)$$

В дальнейшем величина J_{TKE} использовалась для верхней оценки диссипированной в КПС энергии. Расчет толщины КПС осуществлялся по адаптированному варианту метода, представленного в [Klaić et al., 2020]. Детали вычислений представлены в Приложении 1.

Соотношения (2)–(5) позволяют осуществить количественные оценки энергетических параметров в процессе перемешивания и, с использованием соотношения (1), рассчитать эффективность η . Численные значения последнего параметра играют ключевую роль при изучении режима перемешивания и в задаче классификации озер по параметрам перемешивания.

Для примера рассмотрим достаточно рафинированную, но принципиальную задачу о возможности полного перемешивания водоема в течение одного эпизода перемешивания. Предполагается, что в начальном состоянии толща воды была стратифицирована. По известной разности температур ΔT (и, соответственно, плотностей $\Delta \rho$) у поверхности и вблизи дна можно оценить начальное значение потенциальной энергии E_b и изменение ΔE_b при переходе к полностью перемешанному состоянию: $\Delta E_b \sim \Delta \rho g H^2$. С другой стороны, соотношение (1) позволяет по известному значению эффективности η оценить необходимую для полного перемешивания внешнюю энергию ΔE . Более того, при заданном потоке W_0 нетрудно получить оценку для интервала времени τ , необходимого для полного перемешивания вод-

ной толщи: $\tau \sim \frac{\Delta E_p}{\eta J_{APE}} \sim \frac{c\rho}{\eta W_0} H \Delta T$. С использованием представления $N^2 = g \alpha \Delta T / H$ для средней по слою частоты Брента – Вайсяля N выражение для τ можно также представить в

виде: $\tau \sim \frac{c\rho}{\eta \alpha g W_0} H^2 N^2$. Оба варианта формул для величины τ представляют явную зависимость τ от основных параметров H и ΔT (или N^2).

При этом, например, возможность отнесения водоема к классу перемешивания continuous (перемешиваемые ежедневно) будет определяться лишь тем, как соотносится рассчитанная по приведенной формуле величина τ с длительностью эпизодов ночного выхолаживания

(при условии, что известен суммарный поверхностный поток тепла W_0). При этом, на первый взгляд, указанная явная зависимость (например, $\tau \sim H$) согласуется с интуитивными и физически содержательными представлениями. Однако справедливость таких выводов и связанные с ними простые количественные оценки возможны лишь в случае, когда эффективность перемешивания η представляет собой постоянную величину.

Более адекватные выводы можно получить, конкретизируя диапазон возможных значений эффективности η и ее предположительную зависимость от H , N и других параметров. Именно в этой связи величина η находится в фокусе исследований в данной статье.

В заключение раздела следует отметить, что при рассмотрении поверхностного выхолаживания основное внимание было уделено ночным эпизодам. При этом для выделения эпизодов возможно использование нескольких критериев. Простейший из них определяет эпизоды перемешивания как интервалы времени, когда отсутствует коротковолновая радиация [Solcerova et al., 2019]. В рамках альтернативного варианта, использованного в данной работе, эпизоды перемешивания отождествлялись с интервалами времени, в течение которых изменялись средняя по столбу воды температура или ВРЕ. Этот альтернативный вариант представляется более предпочтительным, с учетом достаточно большой тепловой инерции системы, запаздывания ее отклика на внешнее воздействие; характерное время $\tau \sim h_{mix}/w^*$ такой тепловой релаксации с учетом полученной в [Богданов и др., 2023] оценки $w^* \sim 10^{-3}$ м/с составляет 1 час и более.

Результаты

Динамика температуры на разных глубинах за первый месяц наблюдений в 2021 и 2023 гг. представлена на рис. 1 соответствующими семействами линий. На обоих семействах хорошо прослеживаются основные особенности изменений температуры: суточная периодичность в поверхностном слое и синоптическая изменчивость с характерными интервалами 7–12 дней. В циклах дневного нагрева и ночного выхолаживания амплитуда колебаний температуры в верхних слоях водной толщи достигает нескольких градусов. При этом понижение средней по слою температуры в ночное время составляет несколько десятых градуса (рис. 2, а), что согласуется с оценками по формуле (3) при характерных значениях теплового

потока W_0 в несколько десятков Вт/м² [Solcerova et al., 2019; Guseva et al., 2021].

На рис. 2, а, представлены также результаты расчета ВРЕ, осуществленного по формуле (4). Принципиально важный момент заключается в том, что интервалы времени, когда наблюдался локальный прирост E_b , практически совпадали с периодами понижения средней по столбу температуры. Эту особенность совместной динамики средней температуры и базовой потенциальной энергии подчеркивает рис. 2, б, на котором представлены отклонения обеих величин от скользящего 2-часового среднего; эти отклонения происходят практически в противофазе.

Как с физической точки зрения, так и для проведения дальнейших расчетов указанный факт важен тем, что доказывает возможность использования E_b и как прямого индикатора перемешивания, и как количественного параметра для энергетической оценки процесса перемешивания [Winters et al., 1995].

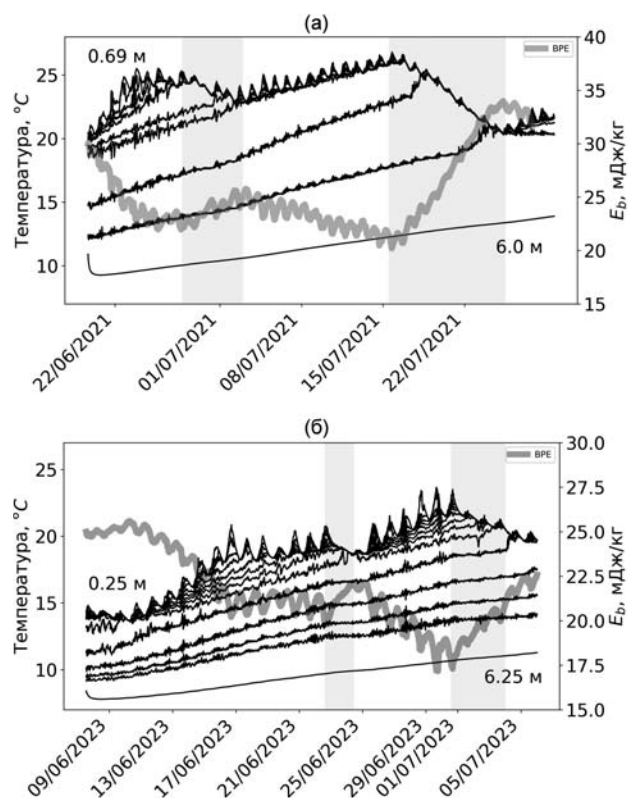


Рис. 1. Изменение температуры и ВРЕ на разных глубинах в 2021 (а) и 2023 (б) годах. Затененные полосы соответствуют интервалам синоптического роста ВРЕ

Fig. 1. Changes in water temperature and BPE at different depths in 2021 (a) and 2023 (б). The shaded areas correspond to the intervals of synoptic growth of BPE

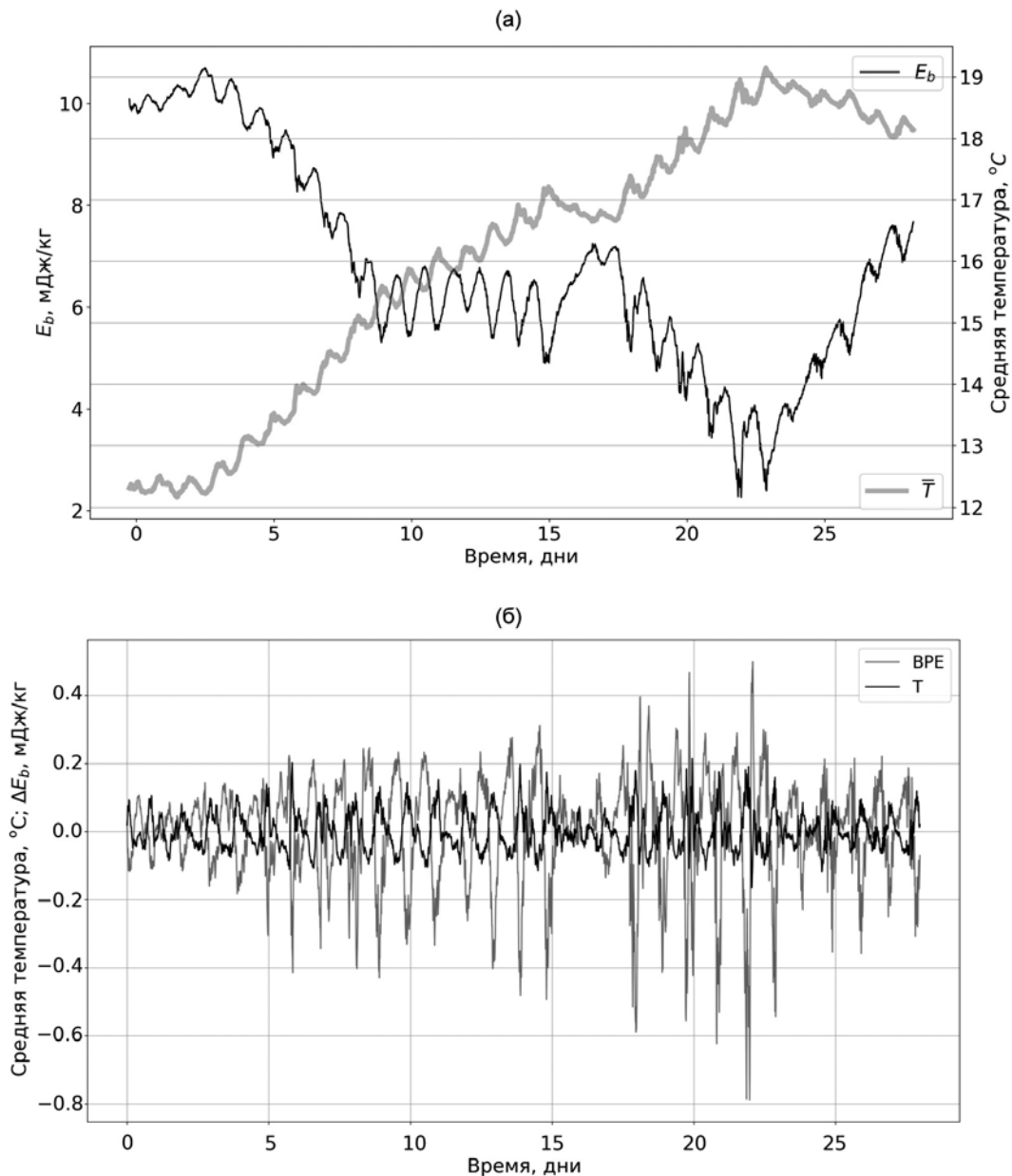


Рис. 2. Динамика ВРЕ и средней по столбу температуры, сезон 2023 г., отсчет дней – от 07.06.2023 (а); вариации (отклонение от 2-часового скользящего среднего) указанных величин в период с 20.06.2023 (б)

Fig. 2. Dynamics of base potential energy and column-average temperature, season 2023, counting days from 06.07.2023 (a); variations (deviation from the 2-hour moving average) of the indicated values in the period from June 20, 2023 (б)

Противофазный характер динамики средней по столбу температуры и ВРЕ характерен и для синоптических (с масштабом около недели) изменений, что наглядно демонстрируют рис. 1 и 2, б. При этом, однако, расчет энергетических параметров и эффективности перемешивания в течение нескольких дней или недель осложняется, например, необходимостью учета ре-стратификации в дневное вре-

мя, а также вариациями толщины перемешанного слоя.

В этой связи при проведении расчетов эффективности основной акцент был сделан на ночном выхолаживании; при этом эпизод перемешивания определялся как интервал времени, в течение которого происходило уменьшение средней по слою температуры и, соответственно, рост величины E_b .

Для некоторых ночных интервалов высокочастотные вариации E_b были весьма существенны, так что в окончательной версии эпизод определялся по характеру изменений осредненной по 2-часовому интервалу величины E_b . Количество таких эпизодов для сезонов 2021 и 2023 гг. составило соответственно 32 и 100.

Для каждого выделенного эпизода при расчете эффективности перемешивания по формуле (1) необходимо определить второй энергетический параметр: количество диссипированной в течение этого эпизода энергии ΔE . В общем случае эта задача весьма сложна, диссипация зависит от параметров турбулентности в водной толще и их распределения по глубине. Косвенно эти особенности проявляются в специфике вертикального температурного профиля.

Вид профилей температуры и плотности, а также их характерная динамика иллюстрируются рис. 3. Для определенности представлено семейство профилей для первого месяца наблюдений в сезоне 2023 г. Многие мгновенные профили характеризуются достаточно сложной ступенчатой структурой, которая, предположительно, отражает тепловую предысторию [Folkard, 2021]. В целом, однако, для большинства профилей характерная особенность заключается в существовании хорошо перемешанного слоя толщиной h_{mix} , примыкающего к поверхности; ниже располагается стратифицированный слой. В связи с этим в дальнейшем при проведении расчетов для всех профилей использовалось указанное двухслойное автомодельное представление. Соответственно, вычисления проводились по формуле (5), с последующим

интегрированием скорости генерации J_{TKE} кинетической энергии по всему интервалу времени, связанному с конкретным эпизодом. Величина h_{mix} , представленная в формуле (5), для каждого момента времени рассчитывалась по методу наименьших квадратов; соответствующий алгоритм представлен в Приложении.

Результаты расчетов эффективности перемешивания представлены на рис. 4. Значения η для разных эпизодов варьировались в достаточно широких пределах (рис. 4, а), при этом дисперсия во многом связана со значительной погрешностью определения толщины перемешанного слоя.

При анализе результатов особого внимания заслуживают два момента. Во-первых, средние по всем эпизодам значения η составили соответственно 0,45 и 0,49 для 2021 и 2023 гг. Оба эти значения существенно превышают наиболее общепринятую оценку 0,17 [Wunsch, Ferrari, 2004; Maffioli et al., 2016; Ulloa et al., 2018]. Кроме того, обнаружено, что значение эффективности варьируется в течение сезона в зависимости от толщины перемешанного слоя. Характер корреляции величин η и h_{mix} иллюстрирует рис. 4, б: с увеличением h_{mix} величина η уменьшается. О возможном влиянии температурного профиля на эффективность ночного перемешивания указывалось ранее в работе [Solcerova et al., 2019].

Дискуссия и заключение

Вопрос об универсальности численного значения (предположительно 0,17) эффективности перемешивания остается одним из самых актуальных при изучении режимов перемешивания.

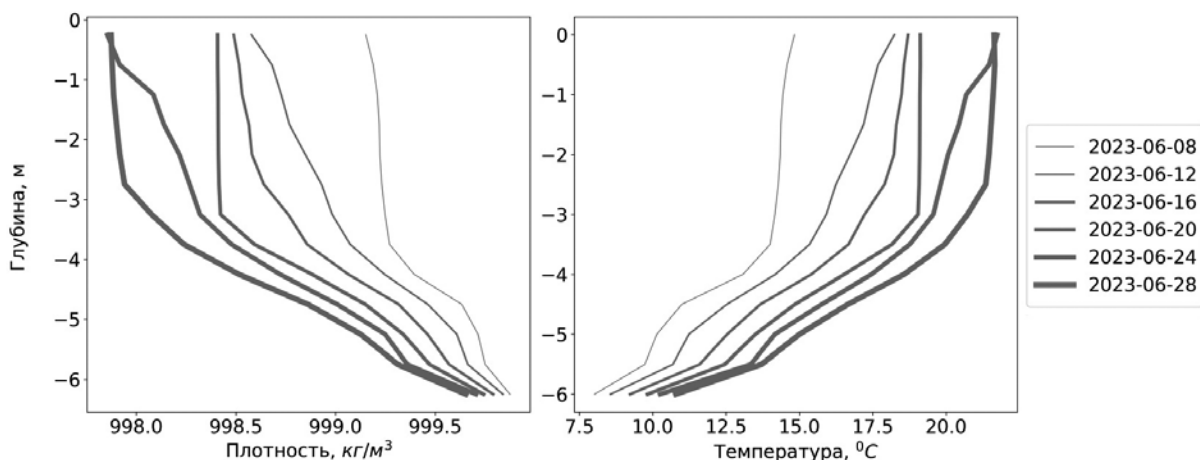


Рис. 3. Динамика полуденных вертикальных профилей плотности и температуры с 8 по 28 июня 2023 г.

Fig. 3. Dynamics of midday vertical profiles of density and temperature from June 8 to June 28, 2023

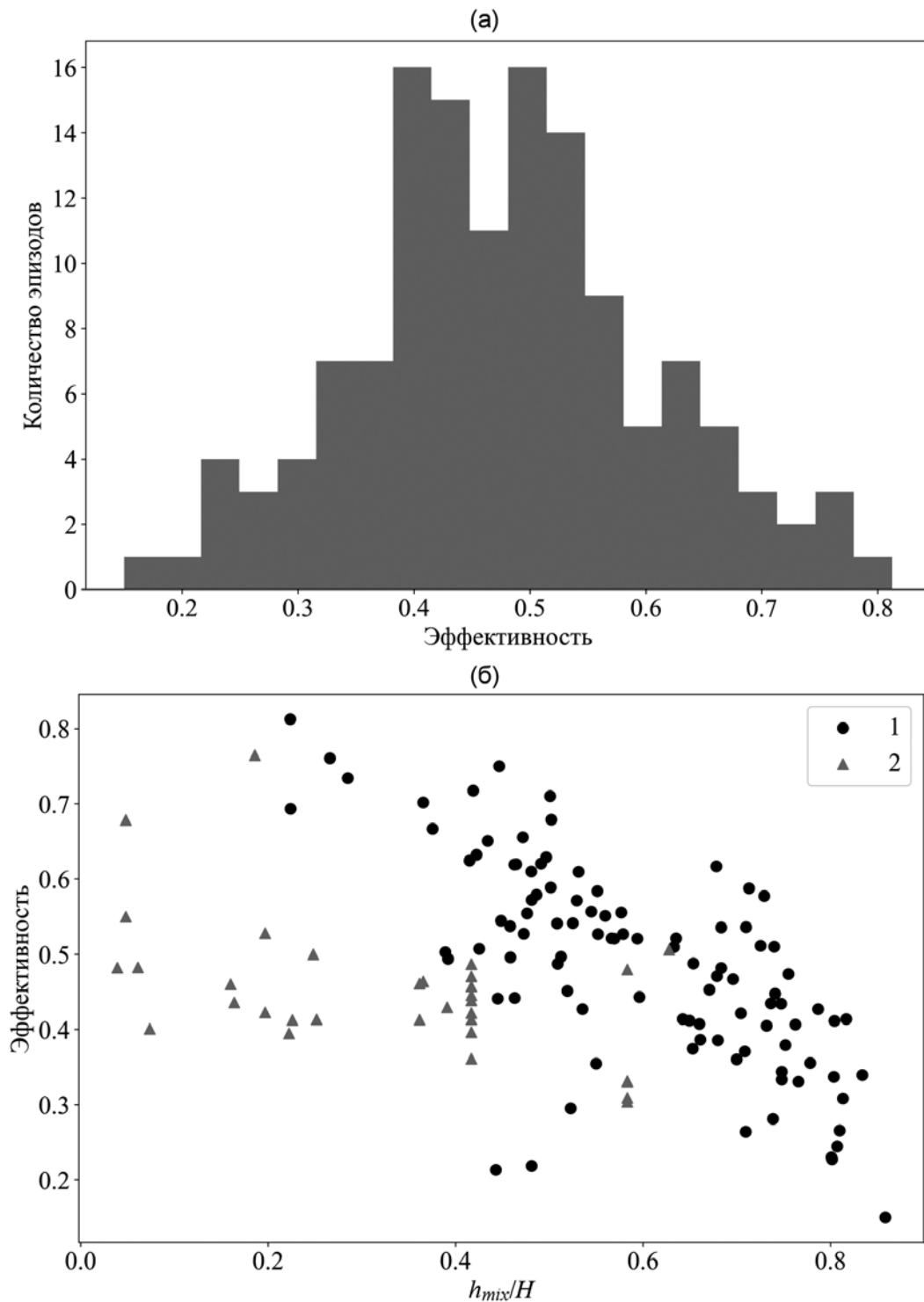


Рис. 4. Гистограмма значений эффективности перемешивания по расчетам для 132 эпизодов (а); эффективность перемешивания водной толщи Голубой ламбы в период открытой воды в зависимости от толщины перемешанного слоя (h_{mix} – толщина перемешанного слоя, H – общая глубина станции, 1 – 2023 г., 2 – 2021 г. Каждая точка соответствует эпизоду ночного перемешивания) (б)

Fig. 4. Histogram of mixing efficiency values based on calculations for 132 episodes (a). The efficiency of mixing of the water column of Blue Lamba (Lake) during the period of open water depending on the thickness of the mixed layer (h_{mix} is the thickness of the mixed layer, H is the total depth of the station, 1 – 2023, 2 – 2021. Each point corresponds to an episode of overnight mixing) (б)

Полученные в данной работе аномально высокие значения η для перемешивания при ночном выхолаживании согласуются с оценками, приведенными ранее в работе [Богданов и др., 2023], а также с результатами расчетов перемешивания в период весенней подледной конвекции [Ulloa et al., 2018]. В этой связи в контексте проблемы универсальности нельзя исключить, что одним из факторов, обуславливающих вариативность η , является механизм накачки. И отсюда можно сделать предварительный вывод о большем значении η в случае радиационного (buoyancy driven) механизма по сравнению с механизмом механической (ветровой) накачки. Для проверки такого предположения требуется проведение более комплексных и точных экспериментов, позволяющих детальнее изучить динамику энергетических параметров в процессе перемешивания. Такой анализ возможен при существенном уменьшении дискретности измерений по вертикали; в экспериментальный комплекс необходимо также включать приборы (например, акустические профилографы), позволяющие провести независимую оценку диссипации.

В работе также установлено, что значение η существенно зависит от формы вертикального профиля плотности непосредственно перед началом эпизода перемешивания. В рамках предположения об автомодельности профиля эта зависимость проявлялась в существовании корреляции между значением эффективности и толщиной КПС. На возможную роль формы профиля как фактора, обуславливающего вариативность η , указывалось ранее в ряде работ, причем в разных контекстах. В работе [Solcero et al., 2019] подобная вариативность величины η рассматривается как результат тепловой инерции водоема. Вопрос о форме профиля как факторе, значимом для η , имеет еще один аспект, связанный с необходимостью разделения водной толщи на активные и пассивные зоны. Как указано в [Brainerd, Gregg, 1995], следует различать перемешанные (mixed) и перемешиваемые (mixing) слои. К последним относятся зоны, в которых происходит активное перемешивание, сопряженное с турбулентным движением жидкости. Перемешанные же (mixed) слои обычно ассоциируются с однородными по температуре участками водного столба, в которых движение жидкости может отсутствовать, а однородность является результатом предшествующих процессов активного перемешивания. Идентификация указанных слоев и их роль в процессе перемешивания более подробно рассмотрены в работе [Davies Wykes et al., 2015]. Показано, что в случае неу-

стойчивых профилей могут существовать слои (remote zones), удаленные от зоны активного перемешивания, однако дающие вклад в доступную потенциальную энергию (рис. 5).

По завершении эпизода перемешивания профиль в этих зонах и, соответственно, потенциальная энергия не изменяются. В некотором смысле происходит прямая (не сопровождаемая диссипацией) трансформация связанной с этими слоями APE непосредственно в базовую потенциальную. Как следствие, эффективность перемешивания оказывается чувствительной по отношению к наличию и протяженности таких удаленных зон.

В целом можно предположить, что в общем случае значение эффективности зависит не только от механизма накачки и параметров турбулентности, но также от начального вида

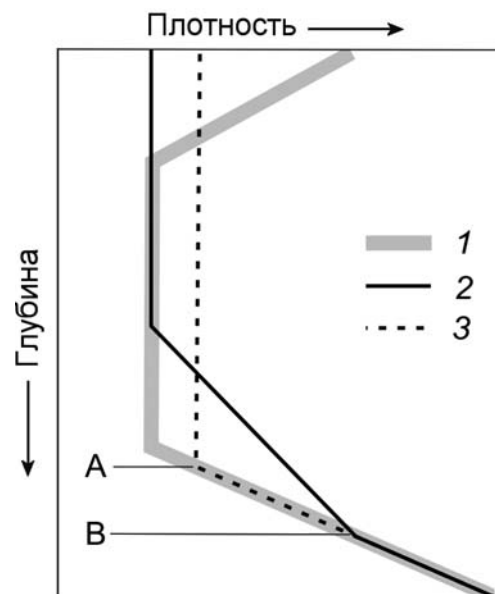


Рис. 5. Схематическое представление профилей плотности в начале (1) и в конце (3) эпизода перемешивания, а также вид начального профиля после адиабатного перераспределения слоев по вертикали в монотонном по плотности порядке (2). Толща воды между глубинами A и B представляет собой пример удаленного от зоны перемешивания слоя, влияющего, однако, на значение эффективности η

Fig. 5. Schematic representation of the density profiles at the beginning (1) and end (3) of the mixing episode, as well as the appearance of the initial profile after adiabatic redistribution of layers vertically in a density-monotonic order (2). The water column between depths A and B is an example of a layer remote from the mixing zone, which, however, affects the value of efficiency η

профиля. И в этом отношении использованный для расчета эффективности интегральный энергетический метод является на данный момент наиболее предпочтительным. Во всяком случае, даже постановка и тем более решение основных проблем, затронутых в обсуждении, выходят за рамки локальных (в пространстве и времени) методов расчета.

Приложение. Расчет толщины перемешанного слоя

Толщина перемешанного слоя определяется по методу наименьших квадратов в рамках предположения об автомодельности вертикального профиля температуры. При этом предполагалось, что водная толща представлена двумя слоями: перемешанным верхним, примыкающим к поверхности озера, и придонным стратифицированным. Температура на дне T_b считалась заданной, и в рамках принятого предположения о структуре автомодельного профиля глубина h перемешанного слоя остается единственным свободным параметром. При этом из семейства автомодельных профилей с разными значениями h выбирается тот, относительно которого разброс опытных данных минимален. Значение h для этого профиля отождествляется с толщиной h_{mix} КПС. Подобный метод был ранее использован в [Klaić et al., 2020] для определения глубины термоклина при использовании 2-слойной ступенчатой модели профиля.

Обозначим за z_i и h_i глубину и толщину слоя, связанного с i -м датчиком, за T_i – показания датчиков в данный момент времени; n – общее число датчиков. Чтобы по заданным T_i и h_i найти толщину перемешанного слоя, для каждого значения параметра h из диапазона $(0, H)$ выполняются следующие действия и расчеты:

– определяется номер i^* последнего датчика, глубина которого меньше h (нумерация датчиков – от поверхности);

– по формуле $\bar{T}(h) = \sum_{i=1}^{i^*} T_i \frac{h_i}{h}$ рассчитывается средняя температура в слое толщиной h ;

– по известным величинам h , T_b и $\bar{T}(h)$ производится построение автомодельного профиля принятого вида:

$$T(z) = \begin{cases} \bar{T}(h), & z < h \\ T_b + \frac{T_b - \bar{T}(h)}{H-h}(z - H), & z \geq h \end{cases};$$

– рассчитываются квадратичные отклонения $D(h)$ экспериментальных данных от функции $T(z)$:

$$D(h) = \sum_{i=1}^{i^*} (T_i - \bar{T}(h))^2 h_i / h + \sum_{i=i^*+1}^n (T_i - T(z_i))^2 h_i / h.$$

Значение h , при котором величина $D(h)$ принимает минимальное значение, отождествляется с толщиной КПС.

На рис. 6 представлены результаты расчета толщины КПС для сезона 2023 г., а также приведена кривая, характеризующая эволюцию температуры верхнего слоя воды (по показаниям ближайшего к поверхности температурного датчика).

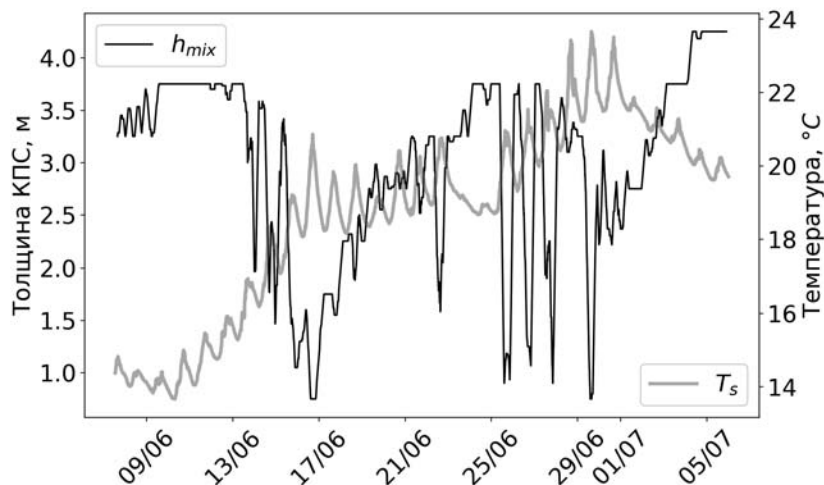


Рис. 6. Результаты расчета толщины h_{mix} КПС в течение первого месяца наблюдений в 2023 г. Вторая кривая представляет эволюцию температуры верхнего слоя воды

Fig. 6. Results of calculating the thickness h_{mix} of the CML during the first month of observations in 2023. The second curve represents the evolution of the temperature of the surface layer of water

Литература

Богданов С. Р., Пальшин Н. И., Здоровеннов Р. Э., Митрохов А. В., Кузнецов П. С., Новикова Ю. С., Здоровеннова Г. Э. Оценка эффективности перемешивания небольшого димиктического озера при поверхностном выхолаживании // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16, № 2. С. 73–88. doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(2)-6

Bluteau C. E., Jones N. L., Ivey G. N. Turbulent mixing efficiency at an energetic ocean site // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013. Vol. 118, no. 9. P. 4662–4672.

Brainerd K. E., Gregg M. C. Surface mixed and mixing layer depths // *Deep Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers*. 1995. Vol. 42, no. 9. P. 1521–1543. doi: 10.1016/0967-0637(95)00068-H

Bouffard D., Wüest A. Convection in Lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019. Vol. 51(1). P. 189–215. doi: 10.1146/annurev-fluid-010518-040506

Chen C.-T. A., Millero F. J. Thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range // *Limnol. Oceanogr.* 1986. Vol. 31, no. 3. P. 657–662. doi: 10.4319/lo.1986.31.3.0657

Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget // *Ecosystems*. 2007. Vol. 10. P. 172–185. doi: 10.1007/s10021-006-9013-8

Davies Wykes M. S., Hughes G. O., Dalziel S. B. On the meaning of mixing efficiency for buoyancy-driven mixing in stratified turbulent flows // *J. Fluid Mech.* 2015. Vol. 781. P. 261–275. doi: 10.1017/jfm.2015.462

Deardorff J. W. Preliminary results from numerical integrations of the unstable planetary boundary layer // *J. Atmos. Sci.* 1970. Vol. 27. P. 1209–1211. doi: 10.1175/1520-0469(1970)027<1209:PRFNIO>2.0.CO;2

Doda T., Ramon C. L., Ulloa H. N., Brendwald M. S., Kipfer R., Perga M.-E., Wüest A., Schubert C. J., Bouffard D. Lake surface cooling drives littoral-pelagic exchange of dissolved gases // *Sci. Adv.* 2024. Vol. 10, no. 4. Art. 0617. doi: 10.1126/sciadv.adi0617

Folkard A. The multi-scale layering-structure of thermal microscale profiles // *Water*. 2021. Vol. 13. Art. 3042. doi: 10.3390/w13213042

Gregg M. C., D'Asaro E. A., Riley J. J., Kunze E. Mixing efficiency in the ocean // *Ann. Rev. Marine Sci.* 2018. Vol. 10, no. 1. P. 443–473. doi: 10.1146/annurev-marine-121916-063643

Guseva S., Casper P., Sachs T., Spank U., Lorke A. Energy flux paths in lakes and reservoirs // *Water*. 2021. Vol. 13. Art. 3270. doi: 10.3390/w13223270

Holgerson M. A., Richardson D. C., Roith J., Bortolotti L. E., Finlay K., Hornbach D. J., Gurung K., Ness A., Andersen M. R., Bansal S., Finlay J. C., Cianci-Gaskill J. A., Hahn S., Janke B. D., McDonald C., Mesman J. P., North R. L., Roberts C. O., Sweetman J. N., Webb J. R. Classifying mixing regimes in ponds and shallow lakes // *Water Resources Res.* 2022. Vol. 58. e2022WR032522. doi: 10.1029/2022WR032522

Jonas T., Terzhevik A. Y., Mironov D. V., Wüest A. Radiatively driven convection in an ice-covered lake

investigated by using temperature microstructure technique // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, no. C6. P. 3183. doi: 10.1029/2002JC001316

Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes // *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 161. P. 179–190.

Klaić Z. B., Babić K., Orlić M. Evolution and dynamics of the vertical temperature profile in an oligotrophic lake // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020. Vol. 24. P. 3399–3416. doi: 10.5194/hess-24-3399-2020

Maffioli A., Brethouwer G., Lindborg E. Mixing efficiency in stratified turbulence // *J. Fluid Mech.* 2016. Vol. 794. R3. doi: 10.1017/jfm.2016.206

Read J. S., Hamilton D. P., Desai A. R., Rose K. C., MacIntyre S., Lenters J. D., Smyth R. L., Hanson P. C., Cole J. J., Staehr P. A., Rusak J. A., Pierson D. C., Brookes J. D., Laas A., Wu C. H. Lake-size dependency of wind shear and convection as controls on gas exchange // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. L09405. doi: 10.1029/2012GL051886

Negandhi K., Laurion I., Whiticar M. J., Galand P. E., Xu X., Lovejoy C. Small thaw ponds: An unaccounted source of methane in the Canadian High Arctic // *PLoS ONE*. 2013. Vol. 8, no. 11. e78204. doi: 10.1371/journal.pone.0078204

Rehder Z., Kleinen T., Kutzbach L., Stepanenko V., Langer M., Brovkin V. Simulated methane emissions from Arctic ponds are highly sensitive to warming // *Biogeosciences*. 2023. Vol. 20, no. 14. P. 2837–2855. doi: 10.5194/bg-20-2837-2023

Solcerova A., van de Ven F., van de Giesen N. Night-time cooling of an urban pond // *Front. Earth Sci.* 2019. Vol. 7, no. 156. P. 1–10. doi: 10.3389/feart.2019.00156

Ulloa H. N., Wüest A., Bouffard D. Mechanical energy budget and mixing efficiency for a radiatively heated ice-covered waterbody // *J. Fluid Mech.* 2018. Vol. 852. R1. doi: 10.1017/jfm.2018.587

Winters K., Lombard P., Riley J., D'Asaro E. Available potential energy and mixing in density-stratified fluids // *J. Fluid Mech.* 1995. Vol. 289. P. 115–128. doi: 10.1017/S002211209500125X

Wunsch C., Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2004. Vol. 36, no. 1. P. 281–314.

References

Bogdanov S. R., Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Mitrokhov A. V., Kuznetsov P. S., Novikova J. S., Zdorovennova G. E. Estimation of mixing efficiency of a small dimictic lake due to surface cooling. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023;16(2):73–88. doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(2)-6 (In Russ.)

Bluteau C. E., Jones N. L., Ivey G. N. Turbulent mixing efficiency at an energetic ocean site. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013;118(9):4662–4672.

Brainerd K. E., Gregg M. C. Surface mixed and mixing layer depths. *Deep Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers*. 1995;42(9):1521–1543. doi: 10.1016/0967-0637(95)00068-H

Bouffard D., Wüest A. Convection in Lakes. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019;51(1):189–215. doi: 10.1146/annurev-fluid-010518-040506

Chen C.-T. A., Millero F. J. Thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range. *Limnol. Oceanogr.* 1986;31(3):657–662. doi: 10.4319/lb.1986.31.3.0657

Cole J. J., Prairie Y. T., Caraco N. F., McDowell W. H., Tranvik L. J., Striegl R. G., Duarte C. M., Kortelainen P., Downing J. A., Middelburg J. J., Melack J. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems.* 2007;10:172–185. doi: 10.1007/s10021-006-9013-8

Davies Wykes M. S., Hughes G. O., Dalziel S. B. On the meaning of mixing efficiency for buoyancy-driven mixing in stratified turbulent flows. *J. Fluid Mech.* 2015;781:261–275. doi: 10.1017/jfm.2015.462

Deardorff J. W. Preliminary results from numerical integrations of the unstable planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.* 1970;27:1209–1211. doi: 10.1175/1520-0469(1970)027<1209:PRFNIO>2.0.CO;2

Doda T., Ramon C. L., Ulloa H. N., Brendwald M. S., Kipfer R., Perga M.-E., Wüest A., Schubert C. J., Bouffard D. Lake surface cooling drives littoral-pelagic exchange of dissolved gases. *Sci. Adv.* 2024;10(4). doi: 10.1126/sciadv.adi0617

Folkard A. The multi-scale layering-structure of thermal microscale profiles. *Water.* 2021;13:3042. doi: 10.3390/w13213042

Gregg M. C., D'Asaro E. A., Riley J. J., Kunze E. Mixing efficiency in the ocean. *Ann. Rev. Marine Sci.* 2018;10(1):443–473. doi: 10.1146/annurev-marine-121916-063643

Guseva S., Casper P., Sachs T., Spank U., Lorke A. Energy flux paths in lakes and reservoirs. *Water.* 2021;13:3270. doi: 10.3390/w13223270

Holgerson M. A., Richardson D. C., Roith J., Bortolotti L. E., Finlay K., Hornbach D. J., Gurung K., Ness A., Andersen M. R., Bansal S., Finlay J. C., Cianci-Gaskill J. A., Hahn S., Janke B. D., McDonald C., Mesman J. P., North R. L., Roberts C. O., Sweetman J. N., Webb J. R. Classifying mixing regimes in ponds and shallow lakes. *Water Resources Res.* 2022;58. e2022WR032522. doi: 10.1029/2022WR032522

Jonas T., Terzhevik A. Y., Mironov D. V., Wüest A. Radiatively driven convection in an ice-covered lake investigated by using temperature microstructure

technique. *J. Geophys. Res.* 2003;108(6):3183. doi: 10.1029/2002JC001316

Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes. *Earth-Science Reviews.* 2016;161:179–190.

Klaić Z. B., Babić K., Orlić M. Evolution and dynamics of the vertical temperature profile in an oligotrophic lake. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020;24:3399–3416. doi: 10.5194/hess-24-3399-2020

Maffioli A., Brethouwer G., Lindborg E. Mixing efficiency in stratified turbulence. *J. Fluid Mech.* 2016;794:R3. doi: 10.1017/jfm.2016.206

Read J. S., Hamilton D. P., Desai A. R., Rose K. C., MacIntyre S., Lenters J. D., Smyth R. L., Hanson P. C., Cole J. J., Staehr P. A., Rusak J. A., Pierson D. C., Brookes J. D., Laas A., Wu C. H. Lake-size dependency of wind shear and convection as controls on gas exchange. *Geophys. Res. Lett.* 2012;39:L09405. doi: 10.1029/2012GL051886

Negandhi K., Laurion I., Whiticar M. J., Galand P. E., Xu X., Lovejoy C. Small thaw ponds: An unaccounted source of methane in the Canadian High Arctic. *PLoS ONE.* 2013;8(11):e78204. doi: 10.1371/journal.pone.0078204

Rehder Z., Kleinen T., Kutzbach L., Stepanenko V., Langer M., Brovkin V. Simulated methane emissions from Arctic ponds are highly sensitive to warming. *Biogeosciences.* 2023;20(14):2837–2855. doi: 10.5194/bg-20-2837-2023

Solcerova A., van de Ven F., van de Giesen N. Nighttime cooling of an urban pond. *Front. Earth Sci.* 2019;7(156):1–10. doi: 10.3389/feart.2019.00156

Ulloa H. N., Wüest A., Bouffard D. Mechanical energy budget and mixing efficiency for a radiatively heated ice-covered waterbody. *J. Fluid Mech.* 2018;852:R1. doi: 10.1017/jfm.2018.587

Winters K., Lombard P., Riley J., D'Asaro E. Available potential energy and mixing in density-stratified fluids. *J. Fluid Mech.* 1995;289:115–128. doi: 10.1017/S002211209500125X

Wunsch C., Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2004;36(1):281–314.

Поступила в редакцию / received: 31.01.2024; принята к публикации / accepted: 09.02.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Богданов Сергей Рэмович

д-р физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

Здоровеннова Галина Эдуардовна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидрофизики

e-mail: zdorovennova@gmail.com

Здоровеннов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Bogdanov, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Leading Researcher

Zdorovennova, Galina

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Head of Hydrophysics Laboratory

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Максимов Игорь Александрович

аспирант

e-mail: maksimovia98@gmail.com

Пальшин Николай Иннокентьевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: npalshin@mail.ru

Maksimov, Igor

Postgraduate Student

Palshin, Nikolay

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher