

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПОКРЫТЫХ ЛЬДОМ ОЗЕРАХ

Г.Э. Здорovenнова¹, канд. геогр. наук, Р.Э. Здорovenнов¹, канд. геогр. наук, С.Р. Богданов^{1,2}, д-р физ.-мат. наук, С.Ю. Волков¹, Г.Г. Гавриленко¹, Н.И. Пальшин¹, канд. геогр. наук, Т.В. Ефремова¹, канд. геогр. наук, А.Ю. Тержевик¹, канд. техн. наук

¹Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

²Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

SPATIAL INHOMOGENEITY OF TEMPERATURE FIELD IN ICE-COVERED LAKES

G.E. Zdorovennova¹, Cand.Sc., R.E. Zdorovennov¹, Cand.Sc., S.R. Bogdanov^{1,2}, Dr.Sc., S.Yu. Volkov¹, G.G. Gavrilenko¹, N.I. Palshin¹, Cand.Sc., T.V. Efremova¹, Cand.Sc., A.Yu. Terzhevnik¹, Cand.Sc.

¹Northern water problems Institute Karelian Research Center, Petrozavodsk, Russia

²Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

Изучение пространственной неоднородности температурного поля в зимний период проводилось на основе экспериментов 2016-2017 гг. в небольшом мелководном озере с целью изучения механизмов появления и разрушения внутренних волн и их влияния на процессы теплообмена и теплопереноса в водной толще покрытого льдом озера.

The study of the spatial inhomogeneity of the temperature field in the winter period was conducted on the basis of experiments of 2016-2017. in a small shallow lake in order to study the mechanisms of the appearance and destruction of internal waves and their influence on the processes of heat exchange and heat transfer in the water column of an ice-covered lake.

Введение.

На небольших озерах умеренного пояса период ледостава продолжается несколько месяцев [1], оказывая большое влияние на функционирование их экосистем. Зимой гидрофизические процессы в озерах замедлены. В условиях практически полной изолированности от ветрового воздействия, сейши, короткие внутренние волны, течения, вихри, циркуляции, развивающиеся в покрытых льдом водоемах, играют решающую роль в перераспределении растворенных и взвешенных веществ, хотя скорости их очень малы [2] и редко превышают 1-10 мм/с.

На этапе осеннего охлаждения водная масса небольших бореальных озер находится в состоянии, близком к гомотермии [3]. Температура водной массы уменьшается при понижении температуры воздуха, при этом тепло теряет не только водная масса озера, но и верхние слои донных отложений [4]. После появления сплошного ледяного покрова, препятствующего переходу тепла из водной массы в атмосферу, начинается повышение температуры воды придонных слоев вследствие теплообмена с донными отложениями. При этом в поверхностных слоях водной толщи температура меняется слабо. Уже в течение нескольких недель ледостава формируется профиль температуры с выраженным скачком градиента вблизи границы с донными отложениями [5], что указывает на немоллекулярную природу процессов теплопередачи. Поток тепла из донных отложений в воду максимален на прибрежных мелководьях в первые дни и недели ледостава, когда он достигает 10 Вт/м². В течение зимнего сезона теплоток постепенно истощается и в конце зимы не превышает 0.5-1 Вт/м² [6, 7].

Длительные непрерывные измерения температуры в небольших бореальных озерах зимой с использованием высокочувствительного оборудования позволили установить, что по всему водному столбу в течение всего зимнего сезона отмечаются колебания температуры широкого спектра периодов – от минут до часов и дней [8, 9]. Существует предположение, что атмосферное воздействие на покрытое льдом озеро, а именно, перепады атмосферного давления и интенсификация ветра, могут приводить к усилению подледной гидродинамики [9, 10]. На фоне резких перепадов давления происходит рост амплитуды колебаний температуры по всему водному столбу и кратковременное усиление теплоточка на границе вода-дно [11], а в штилевых условиях отмечается полное затухание колебаний [9]. Возникновение коротких внутренних волн в покрытом льдом озере и их взаимодействие с сейшами обсуждается в работе [5], где также отмечается периодическая интенсификация колебаний температуры в

течение зимнего сезона. Развитие в подледных слоях озер вихрей и циркуляций различного масштаба, обусловленных особенностями топографии дна, неравномерным распределением плотности, влиянием вращения Земли, обсуждается в ряде работ [12-14]. В весенний период поток солнечной радиации, проникающей под лед, становится главным фактором, определяющим развитие подледной гидродинамики. Наряду с постепенным увеличением толщины конвективно-перемешанного слоя и ростом его температуры отмечается интенсификация волновой активности в нижележащем стратифицированном слое [15], обусловленная, предположительно, неравномерным поступлением тепла в подледный слой мелководных и глубоководных участков и развитием плотностных вдоль склоновых течений.

Таким образом, очевидно, что спектр атмосферного воздействия на малое бореальное озеро, покрытое льдом, достаточно широк, при этом физические механизмы теплопереноса, происходящие как в его водной толще, так и в придонных слоях, остаются слабо изученными.

Настоящая работа посвящена изучению температурных полей в покрытом льдом озере. Анализируются данные длительных непрерывных измерений температуры воды в небольшом карельском озере Вендюрском в зимние месяцы 2016-2017 гг. Рассмотрены особенности термического режима его водной толщи в начале периода весенней подледной конвекции.

Материалы и методы.

Измерения температуры проводились на небольшом мезотрофном озере Вендюрском (южная часть Карелии), подробное описание которого приводится в ряде работ [5, 7, 9, 11]. В центральной глубоководной части озера была размещена коса, оснащенная высокочувствительными температурными датчиками «RBR Ltd.», закрепленными на косе через 0.05-0.5 м, дискретность измерений составляла одну минуту. Верхний датчик косы располагался в 1.5 м ниже уровня воды, нижний – вблизи границы с донными отложениями. Рядом с косой на дне озера была установлена придонная платформа, также оснащенная температурными датчиками «RBR Ltd.», часть которых находилась в придонном слое воды, часть – в верхнем слое донных отложений, общая зона измерений придонной платформы составляла 20 см по вертикали. По данным придонной платформы была получена оценка величины теплопотока на границе вода-дно с использованием широко известного градиентного метода [7]. Коса и придонная платформа находились в озере в период с октября 2016 по июнь 2017 г. В период с 31 марта по 11 апреля 2017 г. в восточной части озера на глубинах порядка 4-6 м были размещены три косы, оснащенные также температурными датчиками «RBR Ltd.», закрепленными с дискретностью 0.25-0.50 м и регистрирующими температуру с дискретностью по времени 10 секунд. Косы были разнесены на расстояние порядка 10 м по продольной оси озера.

Результаты и обсуждение.

В 2016 г. озеро замерзло 6 ноября при температуре водной толщи около 1.8°C, на границе с донными отложениями 2.1-2.7°C, взлом льда происходил 18-19 мая 2017 г., то есть ледостав продолжался 193 дня. Поскольку озеро замерзло очень рано – в первую неделю ноября, при относительно высокой температуре водной массы, температура в придонных слоях глубоководной котловины превысила 5°C уже к 27 ноября, то есть всего через три недели существования льда, а к середине января достигла 5.8°C, оставаясь на таком уровне до конца зимы 2016-2017 гг. Весенняя подледная конвекция началась 6 апреля 2017 г. и продолжилась до взлома льда (конец второй декады мая), достигнув глубины 7 м. Температура поверхностного слоя повысилась до 4.7°C непосредственно перед взломом льда. Озеро вышло из-под льда слабо стратифицированным и было перемешано полностью лишь через 10 суток.

С первых же дней ледостава по всему водному столбу наблюдались резкие скачки температуры, которые были наиболее выражены в придонных слоях озера, где достигали 0.1-0.5 °C и продолжались от нескольких минут до нескольких часов. Возможно, такая выраженная динамика температуры в первые дни ледостава являлась проявлением динамических явлений предледоставного периода. Величина теплопотока на границе вода-дно непосредственно перед появлением сплошного льда достигала 6-8 Вт/м², в первые дни ледостава начала резко снижаться, через три недели ледостава не превышала 2 Вт/м², а с середины января – была менее 1 Вт/м².

В период проведения гидрофизических измерений 30 марта - 11 апреля 2017 г. поверхность льда была покрыта сплошным слоем снега толщиной 2-10 см, общая толщина льда по площади озера изменялась в пределах 56-63 см, слой кристаллического льда в среднем достигал 27 см,

белого – 32 см. В период измерений на фоне холодной облачной погоды интенсивного таяния снежно-ледяного покрова не происходило, дважды выпадал свежий снег. Значения альbedo поверхности озера достигали 0.7-0.9 (за исключением 6, 7 и 10 апреля, когда на фоне солнечной погоды и таяния наблюдалось снижение альbedo поверхности снежно-ледяного покрова до 0.3-0.5). Поток солнечной радиации, проникающей под лед, в период с 31 марта по 5 апреля, а также 8 и 9 апреля после выпадения свежего снега не превышал 5-10 Вт/м², 6 и 7 увеличился до 50 Вт/м², 10 апреля незначительно превысил 25 Вт/м².

По данным придонной платформы и косы, размещенных в центральной части озера, установлено, что в течение всего зимнего сезона по всему водному столбу отмечались высокочастотные колебания температуры, амплитуда которых была наибольшей в придонных слоях, где достигала 0.5°C. Очевидно, что процессы теплопереноса и, соответственно, формирования температурных профилей, определялись мелкомасштабными пульсациями и были обусловлены турбулентной теплопроводностью. Подобные пульсации, в свою очередь, могут быть результатом разрушения или взаимодействия присутствующих в толще воды коротких внутренних волн. Усиление пульсаций температуры происходило на фоне резких перепадов атмосферного давления (на 2-3 мм рт. ст. за 3 ч) и усилений ветра (до 10-15 м/с). При уменьшении скоростей ветра амплитуда высокочастотных пульсаций температуры быстро снижалась.

Высокие значения амплитуды температурных пульсаций и отсутствие четкой зависимости между этими пульсациями и горизонтальной координатой является серьезным аргументом в пользу рассмотрения температурных колебаний как индикатора внутренних волн. Для проверки этого предположения было проведено исследование зависимости амплитуд колебаний температуры от глубины. Результаты варьировали в зависимости от времени и положения измерительной станции, однако в большинстве случаев была обнаружена выраженная зависимость амплитуды пульсаций температуры от глубины. В некоторых случаях отмечалась заметная вертикальная неоднородность столба воды вплоть до разделения на несколько отдельных слоев с высокой амплитудой колебаний, разделенных узловыми линиями с подавленными колебаниями. Подобный результат был обнаружен по данным предыдущих лет исследований [5].

Данные термокос, установленных в апреле, показали наличие высокочастотных пульсаций по всему водному столбу, наиболее выраженных в придонном слое. Формирование конвективного слоя происходило 6 и 7 апреля, однако выпадение свежего снега остановило этот процесс. Интересно, что высокочастотные пульсации температуры имели хорошо выраженный суточный цикл – интенсификация колебаний происходила в дневные часы. В работе [15] сообщается об усилении волновой активности в стратифицированном слое, расположенном ниже конвективно-перемешанного, в вечерние и ночные часы. Высказывается предположение о возможной связи этого явления с неравномерным подледным прогревом мелководных и глубоководных участков акватории Петрозаводской губы Онежского озера. Развивающиеся вследствие этого плотностные вдоль склоновые течения вторгаются между конвективным и стратифицированным слоями и могут провоцировать развитие внутренних волн. В нашем случае измерения проводились, когда конвективный слой еще не был сформирован, однако интенсификация пульсаций температуры именно в дневные часы позволяет предполагать связь с поступлением солнечной радиации в подледный слой озера.

Заключение.

Анализ данных измерений температуры в небольшом мелководном озере Вендюрском позволил выявить основные особенности его теплового режима в зимний период. Характер изменения температурного профиля в первые дни ледостава позволяет предполагать немоллекулярный характер теплопереноса. В течение всего зимнего сезона по всему водному столбу присутствовали колебания температуры широкого диапазона амплитуд и периодов. Анализ пульсаций температуры позволил обнаружить ряд особенностей, совершенно не характерных для баротропных сейш, в частности, зависимость колебаний от глубины. Пульсации температуры по водному столбу в весенний период интенсифицировались в дневные часы, что позволяет предполагать связь этого явления с потоком солнечной радиации, поступающей под лед.

Литература

1. Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdrovennova G., Zdrovennov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // *Aquatic Sciences*. 2012. V. 74. N 4. P. 659-682.
2. Rizk W., Kirillin G., Leppäranta M. Basin-scale circulation and heat fluxes in ice-covered lakes // *Limnol. Oceanogr.* 2014. V. 59. N 2. P. 445-464.
3. Зайков Б.Д. Очерки по озераведению. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1955. 271 с.
4. Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // *Aquatic Ecology* 2009. V. 43, N 3. P641-651.
5. Palshin N.I., Bogdanov S.R., Zdrovennova G.E., Zdrovennov R. E., Efremova T. V., Belashev B. Z., Terzhevik A. Yu. Short Internal Waves in a Small Ice-Covered Lake // *Water Resources*. 2018. V. 45, N 5. P. 695-705.
6. Bengtsson L., Svensson T. Thermal regime of ice-covered Swedish lakes // *Nordic Hydrology*. 1996. V. 27. P. 39-56.
7. Гавриленко Г.Г., Здрoвеннова Г.Э., Здрoвеннов Р.Э., Пальшин Н.И., Митрохов А.В., Терзевик А.Ю. Теплопоток на границе вода-донные отложения в небольшом озере // Труды КарНЦ РАН. 2015. Серия Лимнология. № 9. С. 3-9 DOI: 10.17076/Lim72.
8. Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // *Aquatic Ecology*. 2009. V. 43. №3. P. 641-651. doi:10.1007/s10452-009-9274-3
9. Здрoвеннов Р.Э., Здрoвеннова Г.Э., Пальшин Н.И., Терзевик А.Ю. Изменчивость термического и кислородного режимов мелководного озера зимой // Тр. КарНЦ РАН. 2011. №4. С. 57-63.
10. Петров М.П., Терзевик А.Ю., Здрoвеннов Р.Э., Здрoвеннова Г.Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // *Водные Ресурсы*. 2007. Т. 34. № 2. С. 131-140.
11. Здрoвеннова Г.Э., Здрoвеннов Р.Э., Пальшин Н.И., Ефремова Т.В., Гавриленко Г. Г., Богданов С. Р., Терзевик А. Ю. Тепловой режим мелководного озера зимой // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Лимнология. 2016. №5, С. 3-12.
12. Forrest A. L., Laval B. E., Pieters R., Lim D.S.S. A cyclonic gyre in an ice-covered lake // *Limnology and Oceanography*. 2013. 58(1). P. 363-375. doi: 10.4319/lo.2013.58.1.0363.
13. Kouraev A. et al. Giant ice rings on lakes Baikal and Hovsgol: Inventory, associated water structure and potential formation mechanism // *Limnol. Oceanogr.* 2016. V. 61. P. 1001-1014.
14. Пальшин Н.И., Здрoвеннова Г.Э., Богданов С.Р., Волков С.Ю., Гавриленко Г.Г., Ефремова Т.В., Здрoвеннов Р.Э., Терзевик А.Ю. Геострофические течения в малом озере подо льдом // *Успехи современного естествознания*, 2017. №11, С. 89-94.
15. Bouffard D., Zdrovennov R.E., Zdrovennova G.E., Pasche N., Wüest A., Terzhevik A. Ice-covered Lake Onega: effects of radiation on convection and internal waves // *Hydrobiologia*. 2016. V. 780. N 1. P. 21-36. doi:10.1007/s10750-016-2915-3

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-05-00436_a).

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16-05-00436_a).