

УДК 556.555.4

© М. А. Науменко*

Институт Озероведения РАН, 196105, Севастьянова, д. 9, г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: m.a.naumenko@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ И ПРИВОДНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПРОГРЕВА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Статья поступила в редакцию 04.06.2020, после доработки 24.08.2020

На основе временных пространственных распределений температуры поверхности воды Ладожского озера и температуры приводного воздуха в период существования весенней фронтальной зоны (термобара) установлены климатические количественные соотношения между температурами воды, воздуха, площадями стратифицированной ($T_{\text{пов}} > 4^\circ\text{C}$) и изотермической области ($T_{\text{пов}} < 4^\circ\text{C}$) в Ладожском озере. Эти эмпирические регрессионные модели указывают на устойчивое соотношение между выбранными параметрами и позволяют использовать их при анализе климатических вариаций. Определены климатические величины (нормы) температуры поверхности воды и приводного воздуха и даты их возникновения в период существования весенней термической зоны на Ладожского озера, относительно которых следует оценивать отклонения.

Минимальная температура поверхности воды в глубоководной части Ладожского озера в период возникновения термической фронтальной зоны является своеобразным индикатором («памятью») зимнего состояния озера и значением, с которого начинается прогрев после таяния льда и которое во многом определяет дату исчезновения фронта. Аппроксимация временного хода минимальной температуры поверхности воды в глубоководной зоне озера позволяет оценить дату возникновения первоначальной стратификации всего Ладожского озера. Межгодовые вариации даты исчезновения на поверхности воды 4°C изотермы изменяются от одной до четырех недель, это связано с различиями год от года минимальной температуры поверхности озера в глубоководной части озера, определяемой зимними условиями, ветровой ситуацией, облачностью и, следовательно, интенсивностью прихода тепла в Ладожское озеро. Скорость увеличения температуры поверхности воды стратифицированной зоны значительно больше скорости нагревания изотермической области.

Ключевые слова: весенняя фронтальная зона, температура воды и воздуха, климатические соотношения, Ладожское озеро

© М. А. Науменко*

Institute of Limnology of RAS, 196105, Sevastyanova Str., 9, St. Petersburg, Russia

*E-mail: m.a.naumenko@mail.ru

FEATURES OF CLIMATIC RELATIONSHIPS BETWEEN SURFACE WATER-AIR TEMPERATURE DURING VERNAL HEATING PERIOD IN LAKE LADOGA

Received 04.06.2020, in final form 24.08.2020

Climatic quantitative relationships are established between the surface water and air temperatures, the areas of the stratified ($T_{\text{wsur}} > 4^\circ\text{C}$) and the isothermal area ($T_{\text{wsur}} < 4^\circ\text{C}$) in Lake Ladoga during vernal frontal zone (thermobar) period. Initial data were based on the temporal spatial distributions of the temperature of the water surface of Lake Ladoga and the upper air temperature. These empirical regression models indicate a stable relationship between the selected parameters and allow their use in the analysis of climatic variations. The climatic values (norms) of the surface water and air temperature and the dates of their occurrence during the existence of the spring thermal zone on Lake Ladoga are determined, relative to which deviations should be estimated.

The spring minimum temperature of the water surface in the deepwater part of Lake Ladoga during the appearance of the thermal frontal zone is a kind of indicator (“memory”) of the winter state of the lake and the value from which heating begins after

Ссылка для цитирования: Науменко М.А. Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 2. С. 78–88. doi: 10.7868/S2073667321020076

For citation: Naumenko M.A. Features of Climatic Relationships between Surface Water-Air Temperature during Vernal Heating Period in Lake Ladoga. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 2, 78–88. doi: 10.7868/S2073667321020076

ice melting and which largely determines the date of disappearance of the front. The approximation of the temporal course of the surface water temperature's minimum in the deep-water zone of the lake allows us to estimate the time of onset of full thermal stratification in Lake Ladoga. Interannual variations in the date of disappearance of the isotherm on the water surface of 4 °C changes from one to four weeks in relation to norm, this is due to differences from year to year of the minimum surface temperature of the lake in the deepest part of the lake, determined by winter conditions, wind conditions, cloud cover and, therefore, the intensity of lake-atmosphere heat exchange in Lake Ladoga. The rate of increase in the water surface temperature of the stratified zone is much greater than the rate of heating of the isothermal region.

Key words: vernal frontal zone, water and air temperature, climatic relations, Lake Ladoga.

1. Введение

Одна из характерных особенностей термогидродинамики крупных озёр умеренной климатической зоны заключается в том, что после таяния льда в весенний период в этих озёрах интенсифицируется свободная конвекция, связанная с аномалией плотности пресной воды при температуре 3.98 °C и влияющая на процессы горизонтального и вертикального обмена теплом и массой в водной толще [1, 2]. В годовом цикле в этих озёрах, называемых димиктическими, существуют характерные этапы сезонной изменчивости термического состояния, например, даты полного замерзания озера, — минимального теплосодержания или — возникновения устойчивой стратификации, которые могут быть использованы в качестве климатических реперных величин. Крупнейшее в Европе Ладожское озеро (площадь 17765 км², объём 848 км³, средняя глубина 48 м, максимальная глубина 230 м) представляет собой типичный димиктический водоем, в котором дважды в год происходит свободноконвективное перемешивание от поверхности до дна. В связи с неравномерным распределением глубин мелководная часть Ладожского озера прогревается быстрее районов с большими глубинами, что приводит к ежегодному появлению, развитию и диссипации весенней фронтальной зоны (термобара), которая разделяет устойчиво стратифицированные прибрежные воды от вод глубоководной части озера, где процессы конвективного перемешивания продолжаются [3]. Основным проявлением фронтального раздела на поверхности воды является наличие больших горизонтальных градиентов температуры воды, превышающих средние по озеру в десятки раз, в области 4-градусной изотермы [4]. Термобар в Ладожском озере существует в среднем более двух месяцев с начала мая до начала июля. Фронтальная зона перемещается в направлении увеличения глубин озера. Эволюция термической фронтальной зоны в крупном димиктическом озере — это возникновение и продвижение вертикальной плотностной стратификации от берегов вглубь озера. Дата исчезновения на поверхности 4-градусной изотермы является датой возникновения первоначальной стратификации всего озера и имеет важное значение, как для гидрофизических, так и для гидробиологических процессов, для оценки абиотической составляющей экологического состояния в озере [5–7]. Эта дата, безусловно, является климатической характерной величиной (нормой) при изучении межгодовых изменений термического состояния крупных димиктических озёр.

В современной лимнологии настоятельно возникает потребность в количественной оценке пространственно-временной изменчивости термических процессов крупных озёр в непосредственной связи с их морфометрией, что во многом определяет состояние экосистемы. Настоящая работа преследует следующие цели:

- установление климатических количественных соотношений между температурами поверхности воды (ТПВ), приводного воздуха (на высоте 2 м), площадями стратифицированной (ТПВ > 4 °C) и изотермической области (ТПВ < 4 °C) в Ладожском озере в период существования весенней фронтальной зоны;
- оценка климатических величин (норм) температуры поверхности воды и приводного воздуха и даты их возникновения в период существования весенней термической зоны на Ладожского озера, относительно которых следует оценивать межгодовые отклонения.

А.И. Тихомиров [3] убедительно доказал, что Ладожское озеро обладает большой тепловой инерцией, что позволяет утверждать, что указанные соотношения устойчивы в годовом цикле, а отклонения от них могут характеризовать межгодовые и климатические вариации [8, 9].

2. Материалы и методы исследования

На основе эмпирических моделей горизонтального распределения температуры поверхности воды и компьютерной батиметрической модели Ладожского озера была создана схема среднемноголетнего положения весенней фронтальной зоны в Ладожском озере (рис. 1, а) [10]. При построении этой схемы были использованы данные о ТПВ Ладожского озера с 1898 по 1998 гг. Безусловно, следует заметить, данные были не за каждый год, но общее количество использованных данных о ТПВ превышало 25000 измерений.

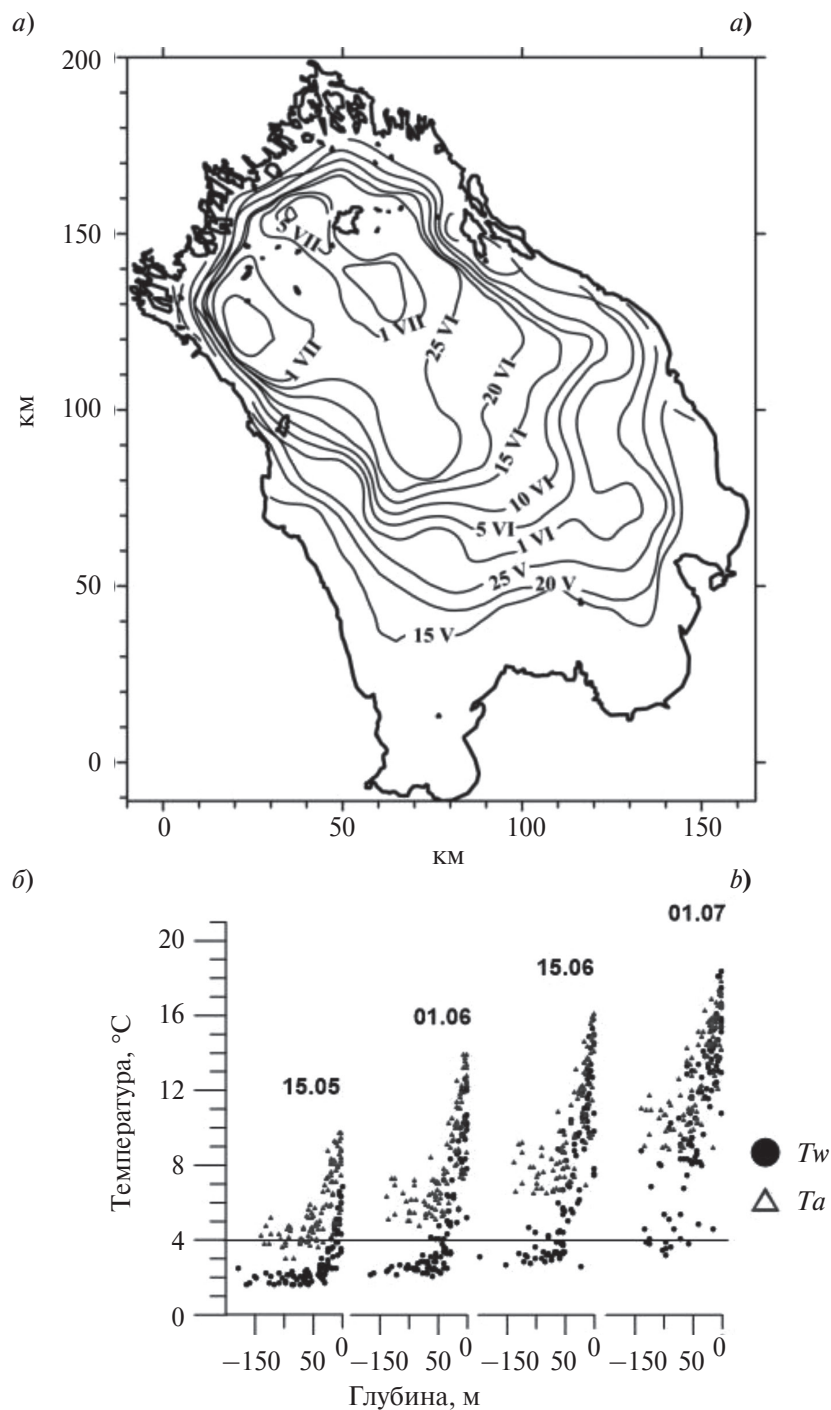


Рис. 1. Среднее многолетнее пространственно-временное положение весенней фронтальной зоны (а) и соответствующие распределения температуры поверхности воды (•) и воздуха (Δ) в зависимости от глубины места (б) в Ладожском озере. Показаны только каждая седьмая из 710 точек.

Fig. 1. The long-term average spatial and temporal position of the vernal frontal zone (a) and the corresponding distributions of the surface water (•) and air temperature (Δ) depending on the bottom depth (b) in Lake Ladoga. Only every seventh of 710 points are shown.

Эта схема была использована для установления статистических связей между параметрами температуры поверхности воды, приводного воздуха, площадями стратифицированной и изотермической зон. В качестве исходных данных использовались цифровые массивы среднемноголетних (фоновых) ежесуточных

пространственных распределений ТПВ и воздуха в узлах равномерной сетки на акватории Ладожского озера с дискретностью пять суток, начиная с 15 мая до 15 июля. Эти распределения были получены на основе эмпирических моделей, разработанных в Институте озераедения РАН [10]. Пространственный шаг эквидистантной сетки был 5 км, что соответствует 711 точкам на акватории озера. На основе этих данных были рассчитаны на указанные даты статистические характеристики (среднее, дисперсия, коэффициент вариации и т.п.) температуры воды, приводного воздуха для стратифицированной и изотермической области с учётом их изменяющихся площадей.

Регрессионный анализ был использован для выявления оптимального вида регрессии, оценки коэффициентов детерминации и их значимости для климатических (среднегодовых) условий в Ладожском озере. При уровне значимости 5 % все рассчитанные коэффициенты детерминации по F- критерию оказались достоверными.

На рис. 1, б показаны примеры распределения температуры поверхности воды и приводного воздуха в зависимости от распределения глубины дна Ладожского озера на начало и середину месяцев для периода, когда существует термобар. Очевидно, что температура воды в глубоководной области озера изменяется от 1.5 до 4 °С, именно в этой области идёт процесс свободной конвекции, причем площадь этой области в процессе весеннего нагревания со временем уменьшается. Было показано, что при изменении уклона дна скорость движения термического бара изменяется [11, 12], что выражается в неравномерном распределении изохрон на рис. 1, а. Исчезновение термобара происходит в первой декаде июля, это указывает на дату возникновения полной первоначальной стратификации озера [5]. Пространственное распределение температуры поверхности воды, так же как и температуры приводного воздуха соответствует распределению глубин озера [13–15], однако разности температуры воздуха и ТПВ $\Delta T = T_a - T_w$ существенно отличаются в областях с температурой поверхности воды больше и меньше 4 °С (рис. 1, б) что несомненно отразится в направленности и интенсивности потоков тепла на границе раздела вода-воздух.

3. Результаты

Климатические соотношения

Средняя климатическая дата возникновения 4-градусной изотермы у берега — 26 апреля, мы принимаем, что на эту дату все Ладожское озеро занято квазиизотермической областью и акватория озера имеет температуру поверхности ниже 4 °С. Вместе с движением фронтальной зоны изменяется соотношением площадей стратифицированной и квазиизотермической областей. Кривая изменения во времени площади изотермической области $S_{\text{изо}}$ (кривая на рис. 2, а) (доли единицы от общей акватории Ладожского озера) соответствует зависимости

$$S_{\text{изо}} = 0.924 - 0.0152 \cdot D + 2.811 \cdot 10^{-5} \cdot D^2,$$

коэф. детерминации = 0.994. Дата ($D = 0$) отсчитывается от 1 мая.

Это нелинейное уравнение позволяет вычислить площадь акватории изотермической области, где идет процесс свободной конвекции, для средних климатических условий (рис. 2, а) на любую дату в период существования термической фронтальной зоны. Например, в конце мая озеро разделено фронтом практически на равные части, что можно видеть на рис. 1, а. В первой декаде июля изотермическая зона исчезает.

Весенняя минимальная температура поверхности воды в глубоководной части Ладожского озера в период возникновения термической фронтальной зоны является своеобразным индикатором («памятью») зимнего состояния озера и значением, с которого начинается прогрев после таяния льда и которое во многом определяет дату исчезновения фронта. Весенняя термическая фронтальная зона существует до тех пор, пока минимальная температура поверхности воды в глубоководной изотермической области не достигнет 4 °С. Это важная дата, является климатическим репером, которая указывает время наступления первоначальной полной стратификации Ладожского озера, относительно которого следует вычислять отклонения, связанные с конкретным годом. Кривая 1 на рис. 2, б демонстрирует изменения минимальной температуры воды $T_{w_{\text{мин}}}$ с начала июня по первую декаду июля. Аппроксимация временного хода этой температуры полиномом третьей степени даёт практически функциональную зависимость.

$$T_{w_{\text{мин}}} = 0.55 + 0.095 \cdot D - 0.002 \cdot D^2 + 1.9 \cdot 10^{-5} \cdot D^3, \quad (1)$$

коэф. детерминации = 0.994.

Важной особенностью зависимости (1) является дата исчезновения известной температуры (4 °С) на поверхности Ладожского озера, которая указывает на прекращение процесса свободной конвекции

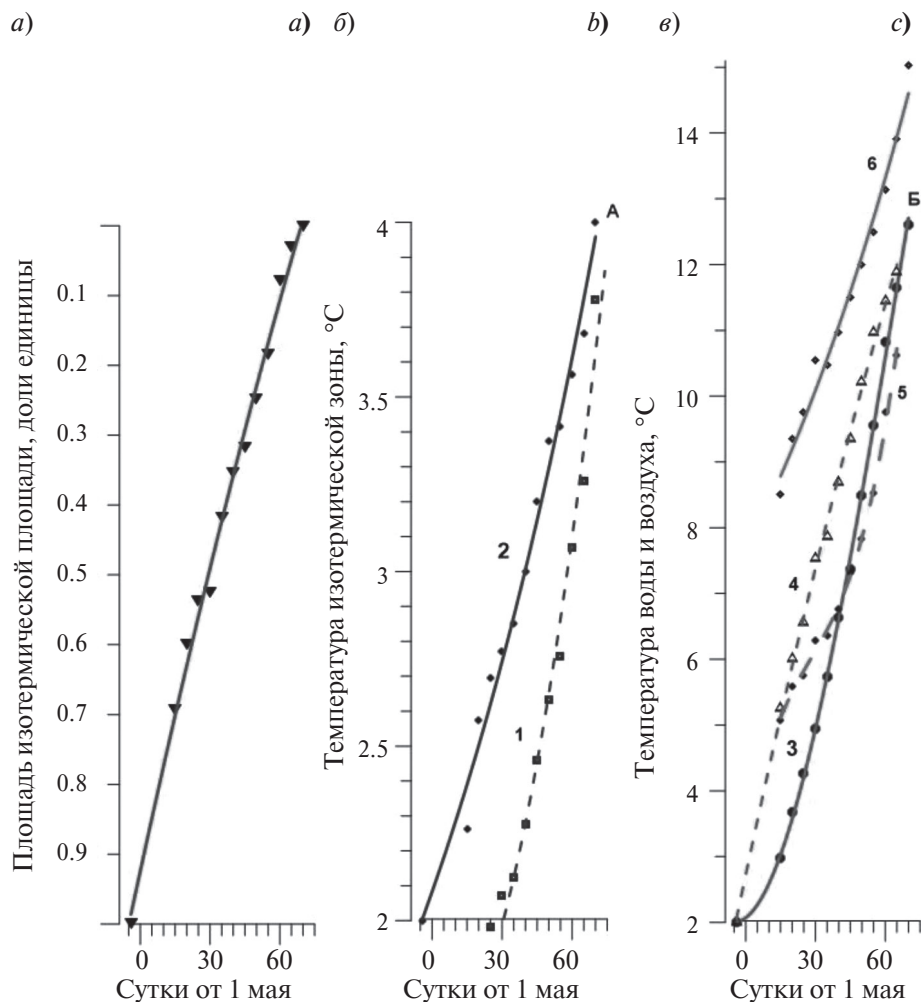


Рис. 2. Климатические зависимости между площадью изотермической области ($T_{\text{пов}} < 4^\circ\text{C}$), температурами поверхности воды, приводного воздуха в Ладожском озере в период существования весенней фронтальной зоны: *a* — временная зависимость изменения площади изотермической области ($T_{\text{пов}} < 4^\circ\text{C}$); *b* — временной ход минимальной температуры воды $T_{w_{\text{мин}}}$ (1); временной ход средней температуры поверхности изотермической зоны $\bar{T}_{w_{\text{изо}}}$ (2); *c* — временной ход температуры поверхности всего озера $T_{w_{\text{озера}}}$ (3), временной ход температуры поверхности стратифицированной области $T_{w_{\text{стр}}}$ (4), временной ход температуры воздуха над изотермической областью $T_{a_{\text{изо}}}$ (5), временной ход температуры воздуха над стратифицированной областью $T_{a_{\text{стр}}}$ (6). Точки А и Б характеризуют дату возникновения первоначальной полной стратификации Ладожского озера.

Fig. 2. Climatic relationship between the area of the isothermal region ($T_s < 4^\circ\text{C}$), surface water temperatures, upper air temperatures in Lake Ladoga during the existence of the spring frontal zone: *a* — the temporal course of the isothermal region area variation ($T_s < 4^\circ\text{C}$); *b* — the temporal course of the minimum water temperature $T_{w_{\text{min}}}$ (1); the temporal course of the average surface temperature of the isothermal zone $\bar{T}_{w_{\text{iso}}}$ (2); *c* — temporal course of the surface temperature of the entire Lake $T_{w_{\text{lake}}}$ (3), temporal course of the surface temperature of the stratified region $T_{w_{\text{str}}}$ (4), temporal course of the air temperature over the isothermal region $T_{a_{\text{izo}}}$ (5), temporal course of the air temperature over stratified region of $T_{a_{\text{str}}}$ (6). Points A and B characterize the time of onset of full thermal stratification in Lake Ladoga.

и формирование устойчивой плотностной стратификации (средняя многолетняя дата — 10 июля). Эту же дату подтверждает ход изменения средней температуры поверхности изотермической зоны $\bar{T}_{w_{\text{изо}}}$ (кривая 2, рис. 2, б)

$$\bar{T}_{w_{\text{изо}}} = \exp(0.0092 \cdot D) \cdot 2.08, \quad (2)$$

коэф. детерминации = 0.986.

Полученные зависимости (1) и (2) свидетельствуют, что скорости изменения $T_{w_{\text{мин}}}$ и $\bar{T}_{w_{\text{изо}}}$ отличаются друг от друга, особенно на начальном этапе существования фронта, но при пересечении в точке А при

температуре наибольшей плотности характеризуют одну и ту же дату — дату исчезновения фронта на поверхности озера, что фактически указывает на возникновение первоначальной полной стратификации Ладожского озера.

Имеющиеся данные и обусловленность соотношений между приходом и расходом энергии на поверхности Ладожского озера позволяют построить зависимости изменения температуры поверхности воды всего озера с момента образования до исчезновения термического фронта на поверхности

$$Tw_{\text{озера}} = 2.07 + 0.026 \cdot D - 0.0027 \cdot D^2 - 1.31 \cdot 10^{-5} \cdot D^3, \quad (3)$$

коэф. детерминации = 0.999,

и температуры поверхности стратифицированной области

$$Tw_{\text{стр}} = 2.72 + 0.166 \cdot D - 3.6 \cdot 10^{-4} \cdot D^2, \quad (4)$$

коэф. детерминации = 0.998.

В начальный момент в период весенней гомотермии (26 апреля) температура изотермической области ($Tw_{\text{изо}}$ — кривая 2) равняется температуре поверхности всего озера ($Tw_{\text{озера}}$ — кривая 3), и поверхность стратифицированной области, которая начинает только формироваться, имеет эту же температуру ($Tw_{\text{стр}}$) — 2 °С. С указанной даты площадь изотермической области, занимающей всю акваторию озера, начинает уменьшаться (кривая на рис. 2, а).

Аппроксимация временного хода средней температуры воздуха в приводном слое в изотермической $Ta_{\text{изо}}$ (кривая 5, рис. 2, в) и стратифицированной $Ta_{\text{стр}}$ областях (кривая 6, рис. 2, в) и позволила оценить её изменения для обеих областей

$$Ta_{\text{изо}} = 3.196 + 0.18 \cdot D - 0.004 \cdot D^2 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot D^3, \quad (5)$$

коэф. детерминации = 0.996,

$$Ta_{\text{стр}} = \exp(0.0089 \cdot D) \cdot 7.723, \quad (6)$$

коэф. детерминации = 0.983.

С использованием спутниковой инфракрасной информации (например, с пространственным разрешением ~1 км (NOAA) или ~100 м Landsat-8 (TIRS)) не трудно оценить площадь Ладожского озера с температурами ниже 4 °С на заданную дату. Далее применяя эмпирические зависимости между температурой поверхности всего озера $Tw_{\text{озера}}$ (7), температурой стратифицированной области $Tw_{\text{стр}}$ (8) и температурой изотермической области $Tw_{\text{изо}}$ (9) и площадью изотермической области $S_{\text{изо}}$ ($Tw < 4$ °С), можно оценить искомые температуры на любую дату периода существования весенней термической зоны (рис. 3), которые необходимы как для описания влияния абиотических факторов на экосистему озера, так и для верификации термогидродинамических моделей.

$$Tw_{\text{озера}} = 12.3595961 - 16.48695024 \cdot S_{\text{изо}} - 0.1991046665 \cdot S_{\text{изо}}^2 + 6.359025318 \cdot S_{\text{изо}}^3, \quad (7)$$

коэф. детерминации = 0.99592,

$$Tw_{\text{стр}} = -10.52170791 \cdot S_{\text{изо}} - 12.52732086, \quad (8)$$

коэф. детерминации = 0.99135,

$$\bar{Tw}_{\text{озера}} = 3.846749088 - 2.132783331 \cdot S_{\text{изо}} - 0.5996176178 \cdot S_{\text{изо}}^2 + 0.8703726442 \cdot S_{\text{изо}}^3 \quad (9)$$

коэф. детерминации = 0.978814.

Эти зависимости (7–9) устанавливают климатические соотношения между площадями и температурами поверхности воды. Зависимость (9) указывает, что увеличение средней температуры поверхности изотермической области с 26 апреля по 31 мая на 0.7 °С уменьшает её площадь приблизительно на 50 %. Исчезновение 4 °С на поверхности, т.е. возникновение полной первоначальной стратификации Ладожского озера, имеет место при нагревании изотермической области с 31 мая по 10 июля ещё на 1.3 °С. На рис. 3 10 июля исчезает изотермическая область с температурой поверхности меньше 4 °С.

Увеличение средней температуры поверхности стратифицированной области на один градус увеличивает площадь этой области лишь на 9–10 %. Как показывает рис. 2, в, в точке Б при равенстве средней температуры поверхности всего озера (кривая 3) и средней температуры стратифицированной области (кривая 4) 12.6 °С четырёхградусная изотерма исчезает с поверхности озера. Эта температура практически соответствует одной и той же горизонтальной координате точек А и Б, что указывает на возникновение полной первоначальной стратификации озера.

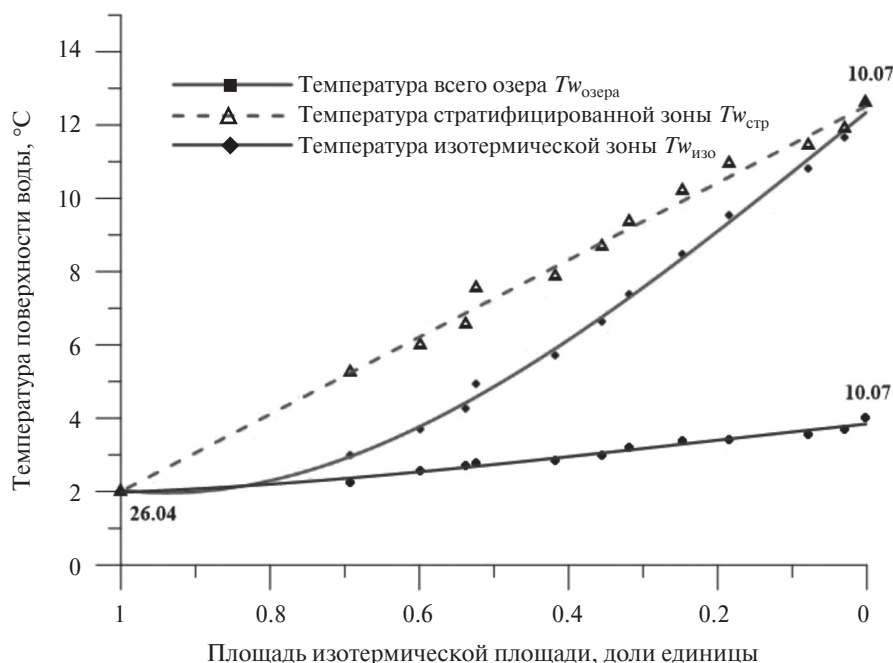


Рис. 3. Изменения температуры поверхности Ладожского озера в зависимости от площади изотермической области.

Fig. 3. Changes in the surface temperature of Lake Ladoga depending on the area of the isothermal area.

Когда акватория озера разделена фронтальным разделом на две равные части, средняя температура воздуха стратифицированной области равняется $\sim 10.1^\circ\text{C}$, а изотермической области $\sim 6.3^\circ\text{C}$. В первой декаде июля заканчивается свободная конвекция в глубоководной части озера, температура воздуха приводного слоя стратифицированной и изотермической областей практически сравниваются и достигают $\sim 15^\circ\text{C}$. Указанные температуры воздуха и воды являются климатической нормой (репером) при изучении климатических вариаций температуры поверхности воды Ладожского озера в период существования весенней термической зоны.

Рассмотренная схема изменений во времени температуры воды (рис. 2 и рис. 3) указывает на достаточно устойчивое соотношение (коэффициенты детерминации более 0.9) между температурами стратифицированной и изотермической областей и их площадями в Ладожском озере.

Следует заметить, что, как уже указывалось выше, разности температуры воздуха и ТПВ $\Delta T = T_a - T_w$ существенно отличаются в областях с температурой поверхности воды больше и меньше 4°C (рис. 1, б) что несомненно отразится в интенсивности потоков тепла на границе раздела вода-воздух. Специализированные измерения зафиксировали различия в вертикальном распределении температуры воздуха в приводном слое толщиной 40 м [16]. Поток тепла за счёт турбулентного теплообмена в обеих частях озера положителен и направлен к поверхности воды.

На рис. 4 показаны различия $\Delta T_{\text{стр}} = T_{a\text{стр}} - T_{w\text{стр}}$ (жирная линия) и $\Delta T_{\text{изо}} = T_{a\text{изо}} - T_{w\text{изо}}$ (тонкая линия), указывающие на принципиальное увеличение потока тепла за счёт турбулентного теплообмена в изотермическую область.

Если до конца мая при прочих равных условиях приход тепла за счёт турбулентного теплообмена в стратифицированную и изотермическую области примерно одинаков по величине при $\Delta T \approx 3^\circ\text{C}$, то с начала июня поток тепла в изотермическую область становится существенно больше ($\Delta T \approx 6\text{--}7^\circ\text{C}$), превышая приход тепла в стратифицированную область ($\Delta T \approx 2^\circ\text{C}$) приблизительно в три раза в период исчезновения фронтального раздела на поверхности озера при прочих равных условиях. Аналогичные выводы были сделаны для различных районов Женевского озера [17].

Поток тепла, приходящий за счёт конденсации (испарения), изменяется по акватории Ладожского озера значительно в период весенне-летнего нагревания, особенно в июне [9], зависит от района и глубины места. Над изотермической областью часто возникает туман, указывающий на приток тепла за счёт конденсации [3]. В Атласе [18] приведены пространственные распределения температуры поверхности воды, температуры и влажности воздуха, соответствующие распределению глубин озера.

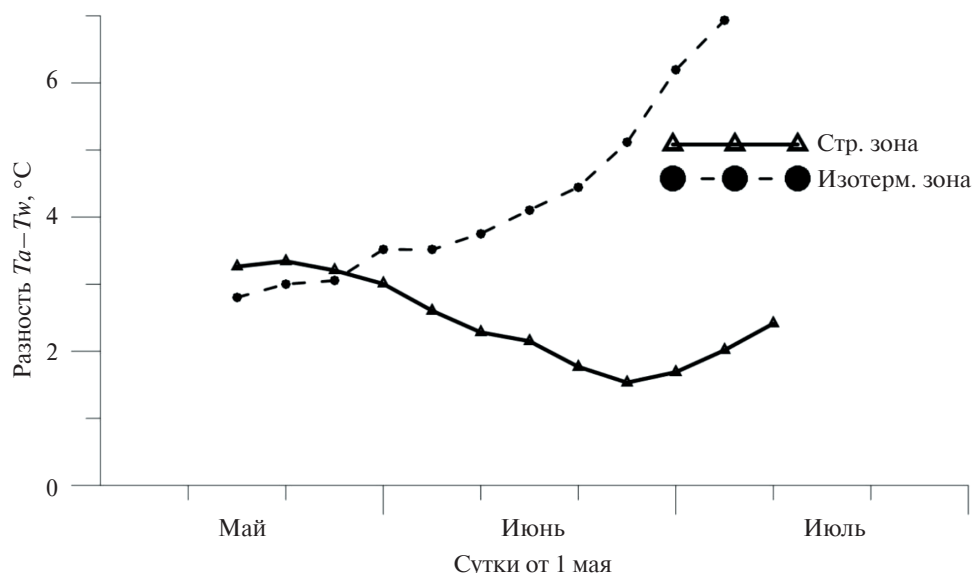


Рис. 4. Временная изменчивость разности $\Delta T = T_a - T_w$ для стратифицированной и изотермической областей Ладожского озера.

Fig. 4. Temporal variability of the $\Delta T = T_a - T_w$ difference for the stratified and isothermal regions of Lake Ladoga.

Скорость увеличения температуры поверхности воды стратифицированной зоны $T_{w_{стр}}$ значительно больше скорости нагревания изотермической области $T_{w_{изо}}$ (кривые 2 и 4 на рис. 2), что приводит наряду с изменениями температуры приводного воздуха к различиям в ΔT в мелководной и глубоководной частях озера.

Следовательно, при анализе потоков тепла у поверхности крупного озера [18], так же, как и при численном моделировании эволюции термобара, необходимо учитывать как пространственную их неоднородность, так дневные и ночные различия в потоках тепла на границе вода-воздух [19].

Межгодовые вариации

На рис. 5, а (см. вклейку) приведены температуры поверхности воды с мая по июль в глубоководной части Ладожского озера за несколько лет более 270 измерений. При переходе температуры через 4°C очевидно резкое возрастание температуры поверхности, когда вертикальная термическая стратификация водной толщи становится устойчивой.

Используя все доступные данные о ТПВ в диапазоне от минимальной 1.5°C температуры до 4°C , уравнение линейной регрессии даёт оценку скорости роста температуры поверхности в изотермической зоне (0.015°C/сут) при небольшой величине объясненной дисперсии (16%). Очевидно, что использование линейного тренда не даёт убедительную оценку изменений минимальной температуры воды. Следуя структуре формулы (1), были аппроксимированы данные для каждого из девяти лет, наиболее обеспеченными майскими измерениями ТПВ (1899, 1902, 1962, 1969, 1981, 1982, 1983, 1989, 2009) и показаны возможные временные изменения минимальной температуры поверхности воды, а также «климатическая» кривая, соответствующая зависимости (1) (рис. 5, б). Временные вариации даты исчезновения на поверхности воды 4°C изотермы составляют от одной до четырех недель, это связано с различиями год от года минимальной температуры поверхности озера в глубоководной части озера, ветровой ситуацией, облачностью и, следовательно, интенсивностью прихода тепла в Ладожское озеро. Свободный член полинома (1) характеризует начальное состояние озера, которое «помнит» зимнее состояние озера, т.е. минимальную температуру поверхности озера перед интенсивным весенним прогревом, а коэффициенты полиномиальной регрессии характеризуют скорость изменения температуры в период весеннего нагревания более детально по сравнению с линейной зависимостью. Минимальная температура воды в глубоководной части озера около $1.4\text{--}2^\circ\text{C}$ может держаться до конца мая-начала июня, как это было в 1981 г. Однако весной 2009 года уже в первой декаде мая температура превышала 1.7°C (рис. 5, б), что несомненно повлияло на дату исчезновения 4°C -градусной изотермы на поверхности озера, что главным образом определяется зимними условиями,

**Даты и температуры воды и воздуха (климатические нормы)
для различных этапов существования весенней фронтальной зоны в Ладожском озере**

**Dates and temperatures of water and air (climate norms)
for various stages of the existence of the vernal frontal zone in Lake Ladoga**

	Дата	$S_{\text{изо}}$	$S_{\text{стр}}$	$T_{w_{\text{изо}}}$	$T_{w_{\text{мин}}}$	$T_{w_{\text{стр}}}$	$T_{w_{\text{озера}}}$	$T_{a_{\text{изо}}}$	$T_{a_{\text{стр}}}$	$T_{a_{\text{озера}}}$
Возникновение	26.04	1	0	2	< 1.0	—	2	2	—	2
50 % акватории	31.05	0.5	0.5	2.7	2.0	7.3	4.9	6.3	10.1	8.2
Исчезновение	10. 07	0	1	—	—	12.6	12.6	—	15.0	15.0

т.е. продолжительностью ледового покрытия и степенью ветрового перемешивания после вскрытия озера. Таким образом, возможны существенные отклонения от среднего многолетнего положения фронтального раздела и даты его исчезновения на поверхности воды.

4. Выводы и заключение

1. На основе средних многолетних ежедневных распределений температуры поверхности воды Ладожского озера построены эмпирические зависимости, позволяющие с высокими коэффициентами детерминации установить соотношения между температурой воды, приводного воздуха и площадями стратифицированной и изотермической областями в период существования весенней термической зоны. Полученные эмпирические зависимости (1–6) нелинейны. Их физическая корректность подтверждается практическим пересечением кривых $T_{w_{\text{озера}}}$ и $T_{w_{\text{стр}}}$ в период исчезновения изотермической области ($S_{\text{изо}} = 0$) (рис. 3), указывающим климатическую дату исчезновения термического фронта в самой глубокой части Ладожского озера около 10 июля.

Эти соотношения дают возможность оценить величины, которые могут служить климатическими нормами (реперами) при анализе межгодовой изменчивости термических процессов в период существования весенней фронтальной зоны в Ладожском озере (табл. 1). Знак «—» означает отсутствие значений из-за отсутствия стратифицированной или изотермической области.

В различных моделях термогидродинамики полученные соотношения могут быть использованы как для задания пространственного распределения потоков тепла на поверхности озера, так и для калибровки и верификации самих моделей.

2. А.И. Тихомиров [3] предполагал, что в период существования весенней фронтальной зоны ежесуточное приращение прихода тепла на поверхность озера постоянно, т.е. суммарный приход тепла линейно увеличивается со временем, что не подтверждается нашими исследованиями. Этот вывод крайне важен при задании потоков тепла в моделях эволюции термобара в Ладожском озере и указывает на необходимость учета их пространственной неоднородности.

3. Зимний режим Ладожского озера и неравномерность прихода тепла на поверхность озера имеют принципиальное значение для оценки положения фронта в крупном озере. Нелинейное (полиномиальное) изменение температуры поверхности изотермической области в период существования термического фронта (рис. 5, б), подчёркивает физический смысл изменений, определяемых зимними условиями на начальном этапе, неравномерностью прихода тепла на поверхности в период развития фронтальной зоны и синоптическими условиями, особенно ветровой ситуацией на этапах диссипации фронта [20, 21]. В двадцать первом веке исчезновение 4-градусной изотермы на поверхности Ладожского озера происходит на две-три недели раньше климатической нормы при резком уменьшении ледового покрытия в зимний период.

4. Методический подход, предложенный в статье, позволяет получить аналогичные климатические величины при изучении весенних термических процессов в других крупных димиктических озерах, в том числе при использовании инфракрасной спутниковой информации.

5. Финансирование

Проведенные исследования выполнены по госзаданию № 0154–2019–0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Литература

1. *Филатов Н.Н.* Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор) // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 3–14. doi: 10.7868/S2073667319010015
2. *Бояринов П.М., Петров М.П.* Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 178 с.
3. *Тихомиров А.И.* Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
4. *Науменко М.А.* Горизонтальные градиенты температуры в термической фронтальной зоне крупного пресноводного озера // *Метеорология и гидрология*. 1989. № 6. С. 89–92.
5. *Rodgers G.* Time of onset of full thermal stratification in Lake Ontario in relation to lake temperature in winter // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1987. N 44. P. 2225–2229.
6. *Moll R.A., Bratkovich A., Chang W., Pu P.* Physical, chemical and biological conditions associated with the early stages of the Lake Michigan vernal thermal front // *Estuaries*. 1993. V. 16, N 1. P. 92–103.
7. *Malm J., Mironov D., Terzhevik A., Jonsson L.* Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data // *Limnology and Oceanography*. 1994. V. 39, N 6. P. 1333–1348.
8. *Fichota Cédric G., Katsumi Matsumoto, Benjamin Holte, Michelle M. Gierach, Kathy S. Tokos.* Assessing change in the overturning behavior of the Laurentian Great Lakes using remotely sensed lake surface water temperatures // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 235, 15 December 2019, 111427.
9. *Ullman David, Jamie Brown, Peter Cornillon, Timothy Mavor.* Surface temperature fronts in the Great Lakes // *Journal of Great Lakes Research*. 1998. V. 24, Iss. 4. P. 753–775.
10. Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В.А. Румянцева и В.Г. Дабковской. СПб.: Наука, 2002. 327 с.
11. *Науменко М.А., Каретников С.Г.* О скорости движения весенней термической фронтальной зоны в Ладожском озере // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 4. С. 107–115.
12. *Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г.* Изменчивость горизонтальных градиентов температуры поверхности воды и воздуха в весенней фронтальной зоне Ладожского озера // *Океанология*. 2012. Вып. 52, № 6. С. 798–803.
13. *Иванова Е.В., Панин Г.Н., Поздняков Ш.Р., Румянцев В.А.* Особенности режима испарения с акватории Ладожского озера // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 11. С. 87–93.
14. *Науменко М.А., Каретников С.Г.* Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией // *Доклады Академии Наук*. 2002. Т. 386, № 2. С. 250–253.
15. *Блохина Н.С., Селин Д.И.* Формирование весеннего термобара в водоеме со сложным рельефом дна (на примере Ладожского озера) // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*. 2019. № 1. С. 58–63.
16. *Naumenko M.A.* Some aspects of the thermal regime of Large Lakes: Lake Ladoga and Lake Onega // *Water Pollution Research Journal of Canada*. 1994. V. 29, N2/3. P. 423–439.
17. *Rahaghi A.I., Lemmin U., Cimamorta A.A., Barry D.A.* The importance of systematic spatial variability in the surface heat flux of a large lake: a multiannual analysis for Lake Geneva // *Water Resources Research*. 2019. V. 55, iss. 12. P. 10.248–10.267. doi: 10.1029/2019WR024954
18. Ладожское озеро и его достопримечательности (атлас) / Под ред. В.А. Румянцева. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
19. *Блохина Н.С.* Численное моделирование развития весеннего термобара и энергообмена между водоемом и атмосферой в ночное время // *Водные ресурсы*. 2014. Вып. 41, № 4. С. 355–361.
20. *Блохина Н.С.* Влияние длительности ветрового воздействия на формирование течений и термобара в пресном водоеме в период таяния ледового покрова // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия*, 2018. № 4. С. 87–93.
21. *Mason Lacey A., Catherine M. Riseng, Andrew D. Gronewold, Edward S. Rutherford, Jia Wang, Anne Clites, Sigrid D.P. Smith.* Fine-scale spatial variation in ice cover and surface temperature trends across the surface of the Laurentian Great Lakes // *Climatic Change*, 2016. doi: 10.1007/s10584-016-1721-2

References

1. *Filatov N.N.* The modern state and perspective investigations of hydrophysical processes and ecosystems of inland waters (a review). *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 1, 3–14 (in Russian). doi: 10.7868/S207366731901
2. *Boyarinov P.M., Petrov M.P.* Processes of thermal regime formation of deep fresh-water lakes. *Leningrad, Nauka*, 1991. 178 p. (in Russian).

3. Tikhomirov A.I. The thermal regime of large lakes. *Leningrad, Nauka*, 1982. 232 p. (in Russian).
4. Naumenko M.A. Horizontal temperature gradients in the thermal frontal zone of a large freshwater lake. *Meteorologia i Hidrologia*. 1989, 6, 89–94 (in Russian).
5. Rodgers G. Time of onset of full thermal stratification in Lake Ontario in relation to lake temperature in winter. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1987, 44, 2225–2229.
6. Moll R.A., Bratkovich A., Chang W., Pu P. Physical, chemical and biological conditions associated with the early stages of the Lake Michigan vernal thermal front. *Estuaries*. 1993, 16, 1, 92–103.
7. Malm J., Mironov D., Terzhevik A., Jonsson L. Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data. *Limnology and Oceanography*. 1994, 39(6), 1333–1348.
8. Fichot C., Matsumoto K., Holt B., Gierach M., Tokos K. Assessing change in the overturning behavior of the Laurentian Great Lakes using remotely sensed lake surface water temperatures. *Remote Sensing of Environment*. 2019, 235. doi: 10.1016/j.rse.2019.111427
9. Ullman D., Brown J., Cornillon P., Mavor T. Surface temperature fronts in the Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research*. 1998, 24, 4, 753–775. doi: 10.1016/S0380–1330(98)70860–3
10. Lake Ladoga: past, present, future / Eds. V.A. Rumyantsev and V.G. Drabkova. *St. Petersburg, Nauka*, 2002. 327 p. (in Russian).
11. Naumenko M.A., Karetnikov S.G. On the velocity of movement of the vernal thermal frontal zone in Lake Ladoga. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 1998, 4, 107–115 (in Russian).
12. Naumenko M.A., Guzivaty V.V., Karetnikov S.G. Variability of the horizontal gradients of the air and the water surface temperatures in the vernal frontal zone period of Lake Ladoga. *Oceanology*. 2012, 52, 6, 735–740.
13. Ivanova E.V., Pozdnyakov S.R., Rumyantsev V.A., Panin G.N. Peculiarities of evaporation regime of Lake Ladoga. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2013, 38, 11, 782–786. doi: 10.3103/S1068373913110083
14. Naumenko M.A., Karetnikov S.G. Seasonal evolution of the spatial distribution of water surface temperature in Lake Ladoga related to its morphometry. *Doklady Earth Sciences*. 2002, 386, 7, 818–820.
15. Blokhina N.S., Selin D.I. Spring thermal bar formation in a water reservoir with a complex bottom relief (for Lake Ladoga as an example). *Moscow University Physics Bulletin*. 2019, 74, 1, 64–69.
16. Naumenko M.A. Some Aspects of the thermal regime of Large Lakes: Lake Ladoga and Lake Onega. *Water Pollution Research Journal of Canada*. 1994, 29, 2 /3, 423–439.
17. Rahaghi A.I., Lemmin U., Cimadoribus A.A., Barry D.A. The importance of systematic spatial variability in the surface heat flux of a large lake: a multiannual analysis for Lake Geneva. *Water Resources Research*. 2019, 55. doi: 10.1029/2019WR024954
18. Lake Ladoga and its Attractions (Atlas) / Ed. V.A. Rumyantsev. *St. Petersburg, Nestor-Istoriya*, 2015. 200 p. (in Russian).
19. Blokhina N.S. A numerical model of spring thermal bar development and energy exchange between a water body and the atmosphere at night. *Water Resources*. 2014, 41, 4, 379–384.
20. Blokhina N.S. The influence of the duration of wind impact on the formation of currents and a thermal bar in a freshwater reservoir over the period of melting of the ice cover. *Moscow University Physics Bulletin*. 2018, 73, 4, 428–434.
21. Mason L.A., Riseng C.M., Gronewold A.D., Rutherford E.S., Wang Jia, Clites A., Smith S.D.P. Fine-scale spatial variation in ice cover and surface temperature trends across the surface of the Laurentian Great Lakes. *Climatic Change*. 2016, 138, 71–83. doi: 10.1007/s10584–016–1721–2

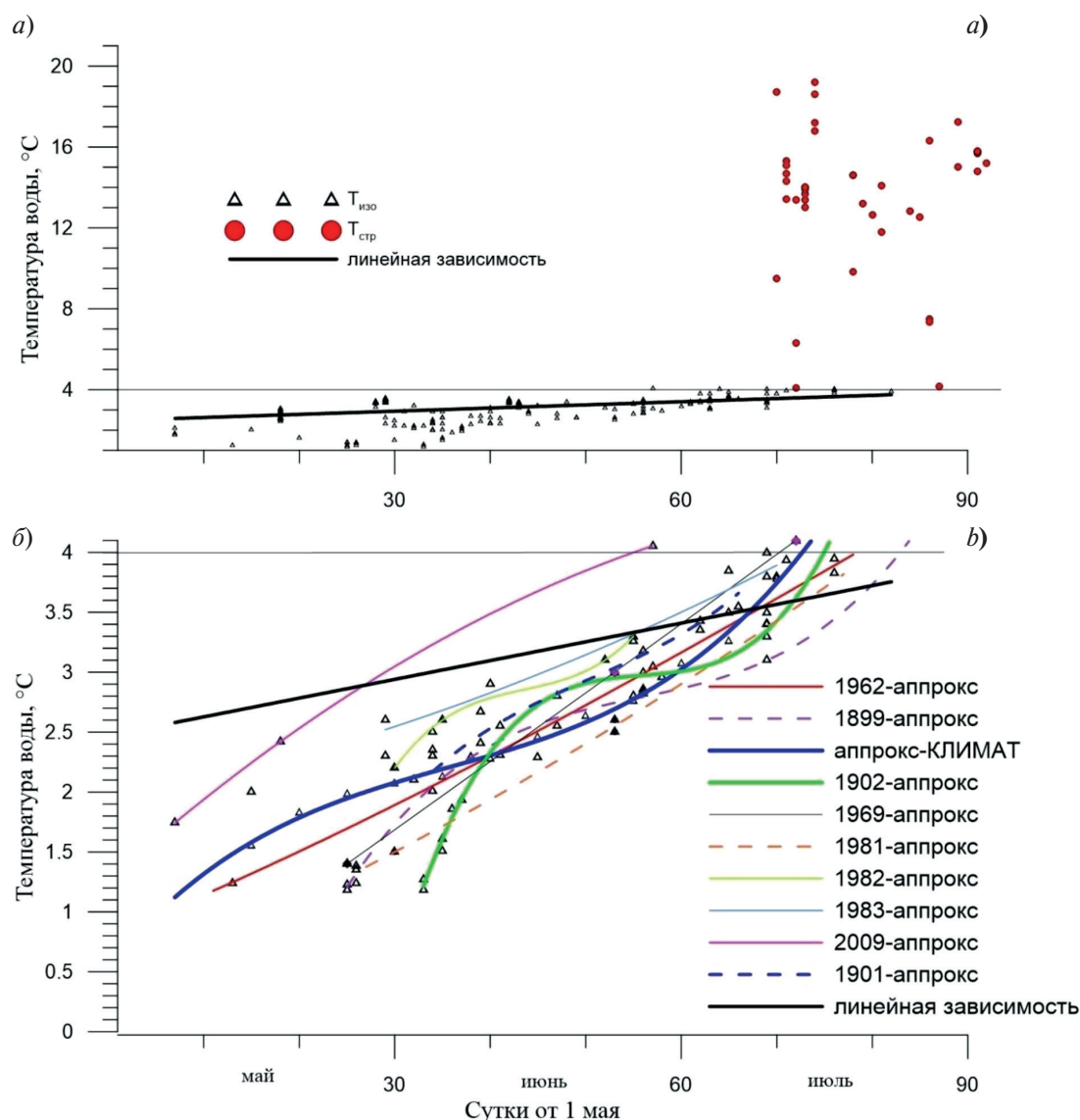


Рис. 5. Изменения температуры поверхности воды (ТПВ) в глубоководной части Ладожского озера на основе данных за 9 лет (а), аппроксимированные полиномиально временные изменения ТПВ для каждого из девяти лет, линейная и полиномиальная регрессия, построенные по всем данным в изотермической области ($T_{\text{пов}} < 4^\circ\text{C}$) в Ладожском озере (б). Точки пересечения кривых с горизонтальной прямой (4°C) указывают на дату исчезновения фронта на поверхности озера.

Fig. 5. Changes in water surface temperature in the deepwater part of Lake Ladoga on the basis of data for 9 years (a), approximation curves for each of nine years, linear and polynomial regression, constructed from all data in the isothermal region ($T_s < 4^\circ\text{C}$) in Lake Ladoga (b). The intersection points of the curves with the horizontal line (4°C) indicate the date of disappearance of the front on the surface of the lake.