

*Л.А. Тимофеева, М.А. Науменко*

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ  
ПОВЕРХНОСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА  
В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ:  
СРЕДНИЕ И АНОМАЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ**

*L.A. Timofeyeva, M.A. Naumenko*

**SPATIAL DISTRIBUTION OF LAKE LADOGA SURFACE  
TEMPERATURE IN ICE-FREE PERIODS:  
MEAN AND ANOMALOUS VALUES**

*На основе термической информации, полученной в ходе 43 экспедиционных съемок, выполненных в период открытой воды с 1960 по 2003 гг., исследуется характер аномальности температурных полей поверхности Ладожского озера. Для всех съемок построены реальные пространственные распределения температуры поверхности и сравнены с типичными распределениями. Показана статистическая значимость полученных отклонений и определены их предельные величины. Выполнено картирование отклонений реальных значений температуры поверхности от их типичных значений. Проведенный анализ полученных карт позволил выявить неоднородный характер пространственно-временной аномальности температурных полей Ладоги. Определены максимально и минимально аномальные месяцы и районы озера, средняя величина площади озера, поле температуры которой соответствует типичному, а также наиболее характерная степень термической аномальности поверхности воды. Проанализированы причины выявленного характера аномальности.*

*Based on the empirical data obtained during 43 expeditions in ice-free periods in 1960–2003, anomalous deviations in real Lake Ladoga surface temperature fields from the typical ones are analyzed. Real surface temperature distributions are designed for each of 43 data sets and compared with the corresponding typical ones. Statistical significance of calculated deviations is shown and their limits are estimated. The anomalous deviations in real surface temperature from the typical pattern are mapped. An analysis of these maps is carried out, which allows us to reveal the heterogeneous character of spatio-temporal anomalies of Lake Ladoga surface temperature fields. Areas and time periods with minimum and maximum anomalous deviations, mean value of surface area corresponding to typical temperature distribution and characteristic degree of anomaly are defined. Some causes for the revealed character of Lake Ladoga surface temperature fields anomaly are analyzed.*

## **1. Введение**

В крупных глубоких пресноводных озёрах в каждый из гидрологических сезонов, особенно в период развитой стратификации, синоптическая и мезомасштабная изменчивости с периодами от нескольких дней до нескольких часов, накладываясь на среднее сезонное распределение характеристик, определяют их реальное распределение. Неверная оценка пространственно-временных

масштабов изменчивости температурных полей и недоучет их неоднородности может привести к ошибочной трактовке их количественных и качественных параметров [1].

Знание средних значений характеристик режима Ладожского озера оказывается недостаточным для понимания и исследования происходящих в нем процессов. Необходимо выявить закономерности их изменчивости для различных пространственно-временных масштабов. В связи с возможными изменениями климата авторами предпринята попытка оценить степень имеющих место отклонений реальных значений температуры поверхности от их средних (типичных) величин, определить процент площади озера с аномальным распределением температуры для различных месяцев в период открытой воды на основе судовых съёмок, выполненных в течение синоптического периода. Результаты проведенного исследования представлены в данной статье.

Исходными данными для построения и анализа пространственных распределений температуры поверхности Ладожского озера послужили экспедиционные судовые съёмки. Институт Озероведения РАН проводит регулярные исследования Ладожского озера с 1956 г. Средние характеристики термического режима озера определены А.И. Тихомировым по данным за 1950–60-е гг. Наличие постоянно пополняющейся компьютерной базы термических данных Ладоги и создание информационно-диагностической системы (ИДС) позволило по-современному подойти к обработке полевой информации. Стало возможно вычислить и построить типичные пространственные распределения температуры поверхности воды на любую дату [Науменко, Гузиватый, Каретников, 2000] в равноотстоящих узлах выбранной сетки для всего озера [Атлас Ладожское озеро, 2002] (рис. 1, а). Последующее сравнение их с наблюдаемыми температурными полями показывает степень соответствия реальных полей типичным.

## **2. Методика анализа и обработки исходных данных**

Поля температуры крупных водоемов формируются под воздействием многих процессов, имеющих разную природу и различные масштабы. Следовательно, их можно рассматривать как совокупность температурных неоднородностей различных пространственно-временных масштабов.

Для конкретной термической съёмки, выполненной в течение нескольких суток, температуру  $f(r, t)$  в данной точке какого-либо горизонта можно выразить в виде суммы детерминированной и случайной составляющей

$$f(r, t) = F(r, t) + u(r, t),$$

где  $F(r, t)$  определяется координатами и глубиной места и представляет собой детерминированную компоненту поля температуры, типичную величину. Составляющая  $u(r, t)$  формируется под воздействием ветра и внутриводных процессов, является случайным отклонением наблюдаемой величины от типичной,  $r$  – радиус-вектор, определяющий положение точки в двумерном пространстве,  $t$  – время.

Количественно определив  $F(r, t)$  и  $f(r, t)$ , мы можем вычислить отклонение  $u(r, t)$ . Под аномальным отклонением будем понимать отклонение реальной температуры поверхности озера от типичной, превышающее  $\pm 0,5^\circ \text{C}$ . Мы полагаем, что за синоптический период в среднем температура поверхности не изменяется более чем на эту величину. Если за период съёмки разность между измеренной и типичной температурой поверхности  $u(r, t)$  превышала  $|0,5^\circ| \text{C}$ , проводилось картирование и анализ полученных карт аномальных отклонений наблюдаемых температур от их типичных значений (рис. 1, в).

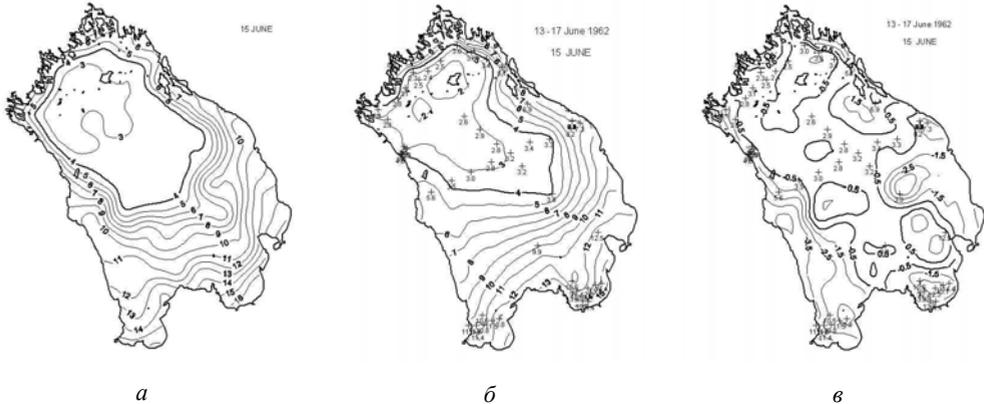


Рис. 1. Пространственные распределения: *a* – типичной температуры поверхности воды озера на 15 июня; *б* – реальной температуры поверхности воды озера на 15 июня 1962 г.; *в* – отклонений реальной температуры поверхности воды озера от типичной на 15 июня 1962 г.

На рис. *б* и *в* знаком «+» обозначены термические станции. На рис. *a* и *б* 4-градусная изотерма соответствует положению термобара.

Для построения пространственного распределения  $f(r, t)$  из электронной базы термических данных Института озераведения РАН были выбраны съемки, выполненные в течение от 3 до 6 суток, т.е. за синоптический период. Однако, только 43 из предварительно выбранных 96 съемок (за период более пятидесяти лет) подверглись детальному исследованию и статистической обработке, поскольку имели необходимое для компьютерной обработки число точек измерений, распределенных достаточно равномерно по всей акватории озера. Эти съемки были выполнены за период открытой воды, самая ранняя – в мае (17–20 мая 1989 г.), самая поздняя – в октябре (20–24 октября 1961 г.) Для сравнения наблюдаемых и типичных температурных полей, вышеуказанные съемки были отнесены к датам, для которых имелось типичное распределение  $F(r, t)$  поверхности озера, приведенное в Атласе [2].

Дальнейшая обработка термических данных выполнялась по методике, аналогичной той, по которой было получено типичное пространственное распределение температуры поверхности Ладоги на конкретные даты [Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее, 2002]. Для более корректного интерполи-

рования в прибрежной зоне температура воды на урезе определялась методом множественной полиномиальной регрессии. Построение реальных пространственных температурных полей осуществлялось интерполированием в узлы равномерной сетки  $5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$  (рис. 1, б). Полученные пространственные распределения  $f(r, t)$  в изотермах сравнивались с распределениями  $F(r, t)$ . Оценка значимости полученных отличий их статистических характеристик (средних величин и дисперсий) показала, что выявленные различия значимы. Анализ карт отклонений реальных температур от типичных позволил выявить закономерности пространственно-временной аномальности температурных полей поверхности Ладожского озера.

### **3. Результаты исследования**

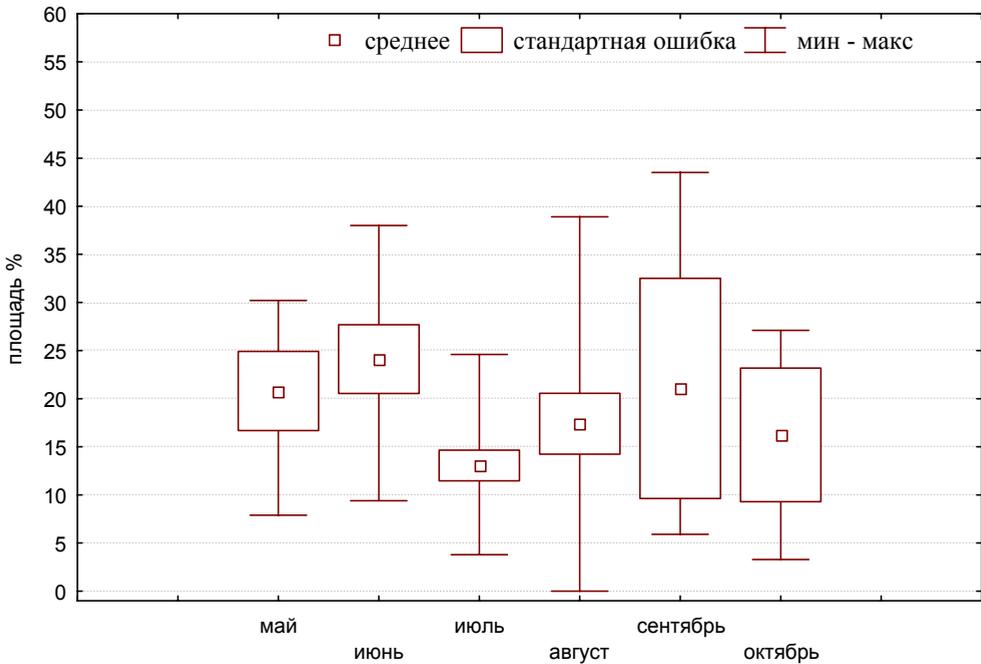
Анализ полученных карт отклонений позволяет утверждать, что наиболее нетипичным, аномальным распределением температуры поверхности воды характеризуется мелководный район Ладожского озера. Этот район с глубинами до 18 м – зона трансформации воздушных масс при переходе с одного вида подстилающей поверхности к другому, где ярко проявляются бризовые эффекты, а при устойчивых ветрах проявляются сгонно-нагонные явления и сопровождающие их апвеллинги и даунвеллинги. Прибрежный мелководный район обладает наименьшей тепловой инертностью, здесь отклонения реальной температуры от типичной могут превышать  $5^\circ\text{C}$  (рис. 1, в).

Однако, над значительными глубинами центральной Ладоги, обладающей максимальной тепловой инертностью, в период гидрологической весны (с середины мая до начала июля) отклонения не превышают  $\pm 1,0^\circ\text{C}$ . Это обусловлено тем, что в указанный период здесь располагается область, ограниченная термическим баром, препятствующим взаимнообмену водных масс, расположенных по разные стороны от него. Исчезновение термического бара приводит к увеличению аномальности глубоководного района.

На рис. 2 представлены статистические характеристики распределения по месяцам средних площадей неаномальных зон, с отклонениями не более  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Площадь поверхности с температурой, соответствующей типичной, изменяется от 1% до 44% площади зеркала. То есть возможна ситуация практически полного несоответствия наблюдаемых температурных полей типичным. В среднем участки поверхности с типичным распределением температуры занимают лишь пятую часть акватории в течение периода открытой воды.

В ходе исследования для каждого месяца были получены значения площадей зон с отклонениями температуры в пределах  $\pm 5,5^\circ\text{C}$ . Эти результаты показывают, что наблюдаемые температурные поля чаще соответствуют типичным в мае, июне и августе (в среднем площадь неаномальных зон составляет 19%, 24% и 20% от общей площади зеркала озера соответственно).



*Рис. 2. Распределение площадей с типичными средними температурами поверхности воды Ладожского озера по месяцам*

Июль – самый аномальный из рассмотренных месяцев. Лишь 13% поверхности озера в среднем не аномально. Этот показатель вдвое ниже соответствующего значения для июня, месяца с наименее аномальными температурными полями поверхности. Столь существенная термическая аномальность июля объясняется неустойчивым характером гидрологических процессов в период их перестройки с весеннего режима на летний после разрушения термической фронтальной зоны.

Очевидно, изменчивость термических характеристик крупных озёр не безгранична. Так, отклонения реальных значений температуры поверхности Ладожского озера от типичных редко превышают  $\pm 5,0^{\circ}\text{C}$ . Преобладающим является интервал отклонений температуры  $+0,5 \dots +1,5^{\circ}\text{C}$ , то есть преобладает незначительный перегрев поверхности озера (рис. 3). Максимально зоны с отклонениями, превышающими  $5^{\circ}\text{C}$ , могут занимать до 18 % акватории озера, а с подобными отклонениями противоположной направленности, то есть превышающими  $-5^{\circ}\text{C}$ , – лишь до 8 %. В среднем площадь поверхности с такими предельными отклонениями занимает 4 и 2 % акватории озера соответственно. Парное сравнение площадей, занимаемых аномалиями одной величины, но противоположного знака, показывает преобладание положительных аномалий над отрицательными для всех расчетных интервалов (рис. 3).

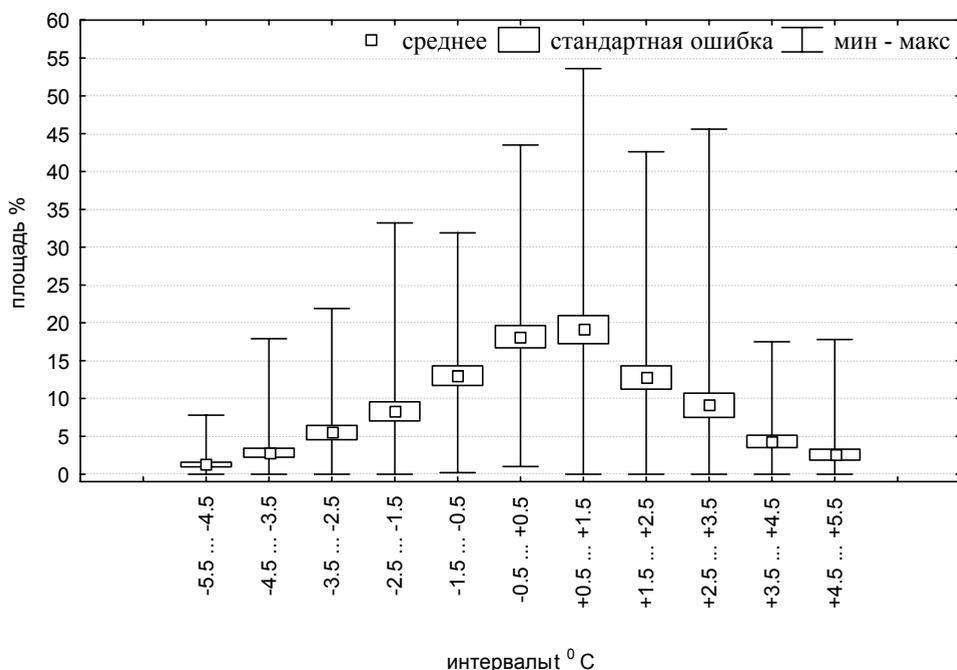


Рис. 3. Статистические характеристики распределения разностей реальных и типичных температур поверхности воды Ладожского озера

Следует отметить, что период наибольшего перегрева поверхности озера по всем анализируемым съёмкам соответствует периоду максимального прогрева поверхности воды Ладожского озера (конец июля – начало августа). Пятнадцать из проанализированных съёмок относятся к периоду 15 июля – 15 августа, абсолютное большинство выполнены после 1981 г., и все они характеризуются превышением площадей с положительными аномалиями над отрицательными.

#### 4. Выводы

Представленное исследование подтверждает существующее мнение о том, что в крупных озерах редко наблюдаются типичные поля элементов их режима. Так, типичное распределение температуры поверхности воды Ладожского озера в период открытой воды практически занимает не более 20 % площади озера. Температура остальной акватории может отклоняться от типичной до 5°C, а в мелководном районе – на еще более значительные величины.

Неоднородный характер пространственно-временной аномальности температуры поверхности озера представляет собой результат воздействия как внешних факторов, так и внутренних, обусловленных морфометрическими особенностями рассматриваемого водоема. Изменения термических характеристик

поверхности Ладоги синоптического масштаба в значительной степени определяются ветровым полем, погодными условиями, однако полученные результаты также могут свидетельствовать о термическом отклике водной массы озера на наблюдаемое в течение последних 20 лет потепление климата.

Выявленные закономерности пространственно-временной аномальности Ладожского озера следует учитывать при моделировании его температурного режима, экологическом моделировании и прогнозировании.

### ***Литература***

1. *Науменко М.А., Каретников С.Г.* Морфометрия и особенности гидрологического режима Ладожского озера. / В кн.: Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. / Под ред. В.А. Румянцева и В.Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002, с. 16–49.
2. Ладожское озеро. Атлас. Институт озероведения РАН. – СПб., 2002, с. 70–72.
3. *Науменко М.А., Гузватый В.В., Каретников С.Г.* Ежедневные средние пространственные распределения температуры поверхности воды Ладожского озера с мая по ноябрь // Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. – Петрозаводск, 2000, с. 335–345.

***Ключевые слова:*** Ладожское озеро, температура поверхности воды, аномалии.