



**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ АНОМАЛЬНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЛИМНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА
ПРИМЕРЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ
ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА**
*METHODOLOGY OF ESTIMATING OF LIMNOLOGICAL CHARACTERISTICS
SPATIAL DISTRIBUTIONS ABNORMALITY ON THE EXAMPLE OF LAKE
LADOGA SURFACE WATER TEMPERATURE FIELDS*

Лариса Тимофеева¹, Михаил Науменко²

1- Российский государственный гидрометеорологический университет,
Гидрологический факультет

98 Малоохтинский пр., Санкт-Петербург, 195196, Россия

Тел.: +(7)9213049836, e-mail: tilarisa@gmail.com

2- Институт озераведения РАН, лаборатория гидрологии

9 ул. Севастьянова, Санкт-Петербург, 196105, Россия

Тел. +7(812)3870260, факс +7(812)3887327, e-mail: naumenko@limno.org.ru

Abstract. *Use of probabilistic approach for estimating of synoptic-scale abnormality is shown. Anomalous deviations of real in situ Lake Ladoga surface temperatures from typical ones were estimated with the data obtained during 43 expeditions 1960 – 2003. These deviations were mapped and statistically analyzed. A degree of spatiotemporal abnormality of real temperature fields, its features and heterogeneous character were revealed. The scales of thermal inhomogeneity are obtained from computation of two-dimensional spatial autocorrelation functions within the random function network. Ways of analysis of characteristics of anomalies fields' correlation ellipses are given. Applicability of the methodology and the results is suggested.*

Keywords: *spatiotemporal variability, anomalies fields, autocorrelation function, anisotropy*

Введение

В крупных глубоких пресноводных озёрах термогидродинамические процессы различных пространственно-временных масштабов определяют реальное распределение лимнических характеристик, изменяя их среднее сезонное распределение. Структура таких случайных полей изучается в рамках вероятностного подхода, основанного на рассмотрении особенностей не отдельных мгновенных полей, а некоторых осредненных свойств статистической совокупности реализаций поля [1]. Масштаб осреднения зависит от масштаба изучаемого явления и цели исследования. Для решения ряда прикладных и научных задач, в частности, для оценки влияния синоптической и мезомасштабной изменчивости на процессы обмена количеством движения, массой и теплом на границе раздела вода-воздух, недостаточно знать средние значения, необходимо охарактеризовать отклонения реальных полей от средних, называемые аномалиями. Исследование реальных полей лимнических характеристик подразумевает разделение их на две части. Первая часть может быть восстановлена на основе имеющейся информации, а вторая часть представляет собой разность между восстановленной и реальной частями поля – аномалию. Для получения первой компоненты поля – среднего значения исследуемой характеристики, часто используют процедуру пространственно-временного осреднения. В настоящей работе, на примере полей температуры поверхности ($T_{\text{пов}}$) Ладожского озера, показано, как на основе имеющихся аналитических зависимостей и по данным выборок независимых реализаций случайного поля можно оценивать аномальность полей лимнических характеристик.

Для этого необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Рассчитать средние распределения исследуемой характеристики (в нашем случае это температура поверхности $T_{\text{пов}}$ Ладожского озера).
 2. Построить реальные распределения $T_{\text{пов}}$, задав масштабы пространственного и временного осреднения.
 3. Рассчитать и построить поля аномалий.
 4. Оценить значимость различий между статистическими характеристиками реальных и средних полей.
 5. Статистически проанализировать поля аномалий.
 6. В рамках теории корреляционных функций оценить степень связности полей аномалий.
- Данная нумерация соответствует порядку изложения в тексте.

Материалы и методы

Каждая реализация поля $T_{\text{пов}}$ представляет собой совокупность измерений температуры поверхности, произведенных на акватории озера за период от 3 до 6 суток (синоптический период), будем называть ее термической съёмкой. Температуру в конкретной точке T_{τ} конкретной термической съёмки, выполненной в течение нескольких суток τ , можно выразить в виде суммы детерминированной и случайной составляющей:

$$T_{\tau} = T_{0\tau} + \Delta T_{\tau}, \quad (1)$$

где $T_{0\tau}$ представляет собой детерминированную компоненту, которую мы вычисляем аналитически и называем типичным значением температуры поверхности для выбранной даты. ΔT_{τ} – случайное отклонение реальной наблюдаемой температуры T_{τ} от типичной. Вычислив T_{τ} и $T_{0\tau}$, найдем отклонение ΔT_{τ} . При фиксированном временном периоде поле отклонений ΔT_{τ} будем называть полем аномалий $T_{\text{пов}}$.

1. Ладожское озеро, крупнейшее в Европе, систематически изучается с 1956 г. и к настоящему времени в Институте Озероведения АН России в виде базы данных организовано более 250 тысяч измерений температуры воды и сопутствующей гидрометеорологической информации. Столь высокая степень гидрологической изученности и информационной обеспеченности позволяет получить типичные и реальные поля $T_{\text{пов}}$ на конкретные даты и решить поставленные выше задачи. Для этого необходимо применять методы, позволяющие избежать влияния нерегулярного распределения наблюдений во времени и пространстве на осреднение $T_{\text{пов}}$. В Институте был разработан такой метод вычисления и построения типичных полей $T_{\text{пов}}$ воды на любую дату для периода открытой воды [2, 3]. Для этого поверхность озера была разделена равномерной сеткой на 235 квадратов, со стороной примерно равной 10 км. Сезонный ход температуры поверхности в каждом квадрате был аппроксимирован аналитической зависимостью, представляющей собой комбинацию двух функций, описывающих временной ход $T_{\text{пов}}$ в течение различных гидрологических сезонов [3]. Для ее построения было привлечено более 25 тысяч данных натурных измерений за период с 1897 г. по 2006 г. Пространственные распределения $T_{0\tau}$ на конкретные даты получены интерполированием вычисленных значений в узлы равномерной сетки с шагом 5 км. Число расчетных узлов сетки составило 713. Построенные таким образом распределения [2] называем типичными (Рис.1а), поскольку получены они не в результате осреднения, а с использованием вышеупомянутой зависимости.

2.–3. Для построения реальных пространственных распределений T_{τ} из электронной базы термических данных были выбраны 43 судовые съёмки, выполненные за период открытой воды с 1960 г. по 2003 г. и имеющие достаточное для компьютерной обработки число точек измерений, распределенных относительно равномерно по акватории. Для более корректного интерполирования в прибрежной зоне строился полином $T = f(x, y, z)$, связывающий температуру с координатами и глубиной места, и вычислялись ее значения

на нулевой изобате. Обработка натуральных данных по методике, аналогичной методике построения типичных полей $T_{\text{пов}}$ на конкретные даты, позволила получить реальные распределения $T_{\text{пов}}$ (Рис.1б).

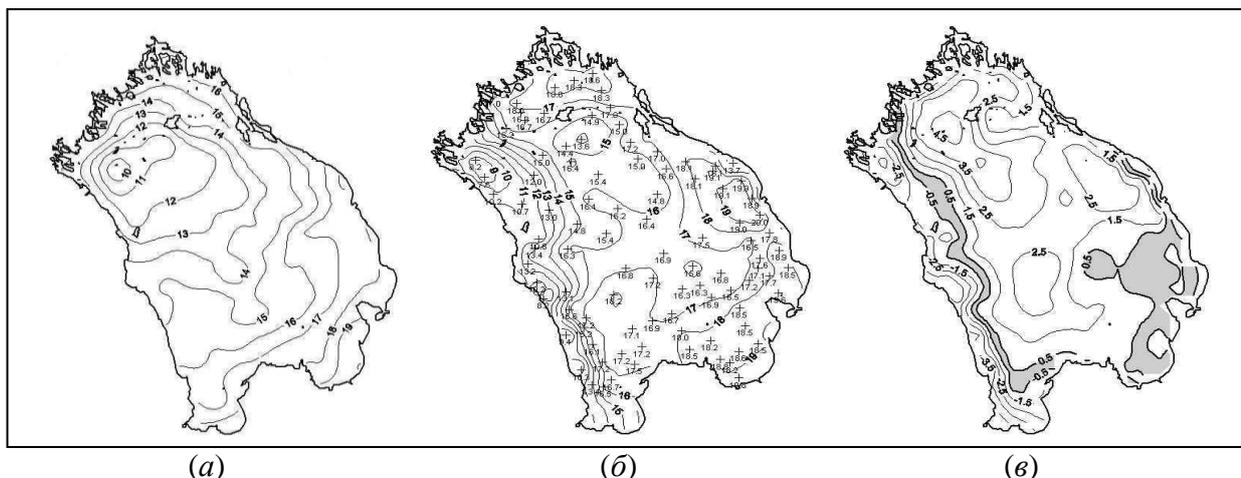


Рис.1. Распределения: (а) типичной температуры поверхности воды на 25 июля, (б) реальной температуры поверхности воды на 25 июля 1984 г., (в) аномалий на 25 июля 1984 г. Знаком + обозначены термические станции. Заштрихованная область - район типичного распределения температуры поверхности воды.

Сравнивая поля T_t и T_{0t} (Рис.1а, б) за определенную дату, получаем поля отклонений ΔT_t на эту дату (Рис.1в). ΔT_t , превышающие $|0,5|^\circ\text{C}$, назовем аномальными. Отклонения ΔT_t картировались для всех 43 съёмок.

Результаты и обсуждение

4. В первую очередь оценивалась значимость различий между реальными и типичными полями $T_{\text{пов}}$ по критериям Стьюдента и Фишера [4]. Сравнение средних величин температуры реальных и типичных полей при 1% уровне значимости показало значимость разностей для 38 из 43 съёмок. Оценка расхождений между дисперсиями рассматриваемых пар выполнялась сравнением с критическим значением параметра Фишера ($F_{\text{крит}}=1$). Все $F > F_{\text{крит}}$. Следовательно, имеющиеся различия не случайны, а выборки не принадлежат одной совокупности.

5. Последующий анализ позволил оценить характер пространственно-временной аномальности реальных полей $T_{\text{пов}}$, определить величины аномалий $T_{\text{пов}}$ и площадей ими занимаемых [5]. Для каждого месяца были получены значения площадей зон с отклонениями $T_{\text{пов}}$ в пределах $|5,5|^\circ\text{C}$. Преобладает интервал отклонений $\Delta T_t + 0,5^\circ\text{C} \dots + 1,5^\circ\text{C}$. В целом положительные аномалии превалируют над отрицательными (Рис.2а). Наиболее аномально распределено $T_{\text{пов}}$ в прибрежном мелководном районе, обладающем минимальной тепловой инерцией. Это зона трансформации воздушных и водных масс, где наблюдаются бризы и сгонно-нагонные явления, сопровождающиеся апвеллингами и даунвеллингами. Здесь аномалии достигают $|8,0|^\circ\text{C}$. Над значительными глубинами центральной Ладоги, наиболее теплоинертной, в период гидрологической весны отклонения не превышают $|1,0|^\circ\text{C}$. После разрушения термобара аномальность глубоководного района увеличивается.

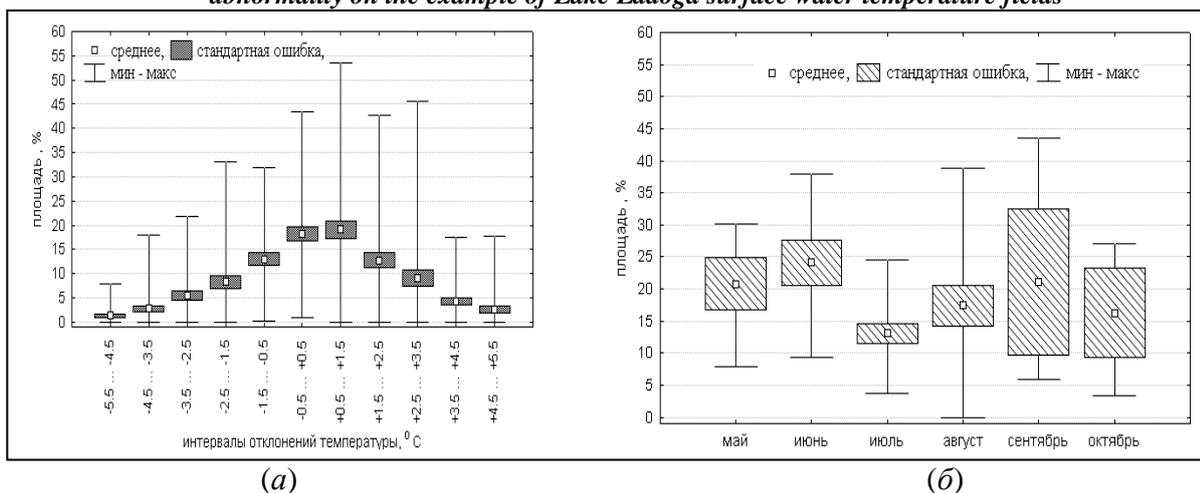


Рис.2. Статистические характеристики распределения:

- (а) отклонений реальных температур поверхности воды от их типичных значений,
 (б) площадей с типичными средними температурами поверхности воды по месяцам

На Рис.2б представлено распределение площадей не аномальных участков поверхности озера. Площадь зон с типичной температурой до 44%. В среднем $T_{\text{пов}}$ 20% акватории соответствует типичной. Реальные поля чаще соответствуют типичным в июне и августе (в среднем не аномальные зоны занимают 24% и 20% акватории). Июль - самый аномальный месяц, только 13% поверхности в среднем не аномально (Рис.2б). Выявленная неоднородность пространственно-временной изменчивости полей $T_{\text{пов}}$ озера обусловлена особенностями его гидрологического режима и процессами на границе воздух-вода.

б. Корреляционный анализ позволяет охарактеризовать пространственную связность случайных полей. Для всех полей аномалий были рассчитаны автокорреляционные функции и построены эллипсы корреляции. Их формы, размеры и ориентация весьма разнообразны (Рис.3 а). Статистически анализировались следующие параметры по значению коэффициента корреляции $K=0,5$: большая и малая ось, эксцентриситет (отношение большой оси к малой) и ориентация эллипса – отклонение большой оси эллипса от направления З – В по часовой стрелке (Рис.3 а). Эксцентриситет служит мерой анизотропии рассматриваемого поля, и при равенстве осей эллипса равен 1, что соответствует изотропии поля. Ориентация эллипсов может нести информацию о преобладающих факторах генерации полей аномалий и о соотношении между ними. Так, эллипсы наиболее вытянуты в направлении С – Ю в августе в период развитой термической стратификации и максимальной мощности эпилимниона. В мае и октябре, при горизонтальной однородности $T_{\text{пов}}$, ориентация эллипсов близка к 40°. В периоды нестабильности температурных полей, после разрушения термобара и в сентябре, когда увеличивается воздействие ветра, она приближается к 50°. Синхронность изменения ориентации эллипсов типичных полей $T_{\text{пов}}$ и полей аномалий (Рис.3 б) может указывать на соотношение между силами, формирующими эти поля.

Так, синхронный ход ориентации эллипсов в течение определенного периода может свидетельствовать о том, что их формирование в этот период обусловлено одними и теми же факторами, и наоборот.

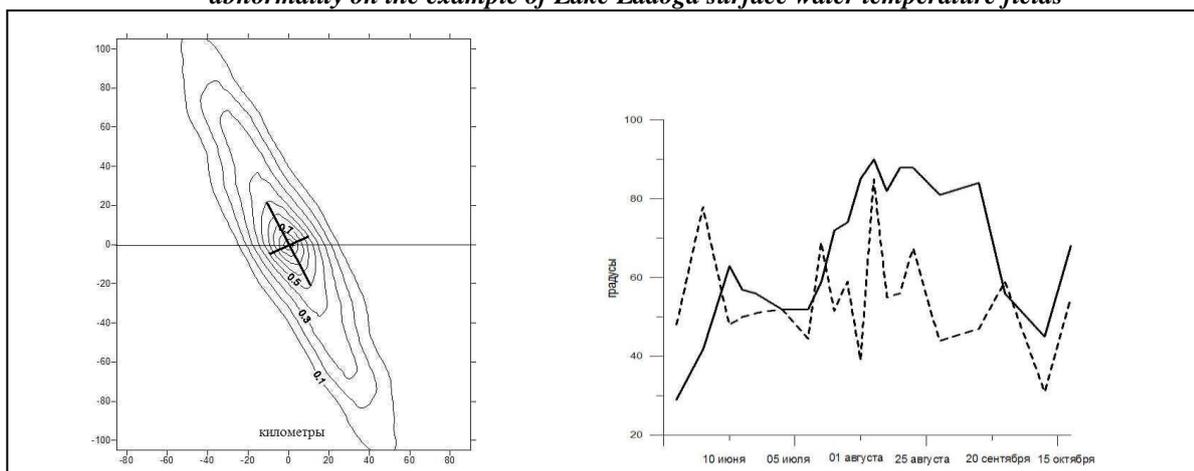


Рис.3. (а) Пример двумерной пространственной автокорреляционной функции поля аномалий.(б) Ориентация эллипсов корреляции: —типичных полей, - - - полей аномалий

На Рис.4 представлены результаты статистической обработки больших и малых осей эллипсов корреляции полей аномалий. В среднем они изотропны в радиусе около 2,5 км ($K=0,9$). Изотропность существенно упрощает описание случайного поля и является необходимым условием при решении ряда задач гидрофизики и гидродинамики.

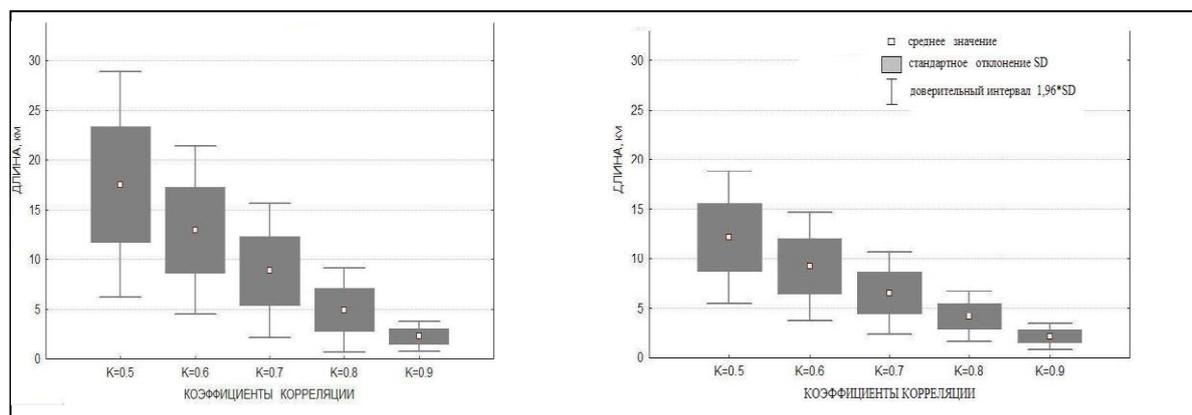


Рис.4. Статистические характеристики больших (а) и малых (б) осей пространственных автокорреляционных функций полей аномалий

Рис.5 показывает временной ход меры анизотропии эллипсов корреляции для разных степеней однородности полей. Поля аномалий более изотропны в октябре, когда значительная часть акватории гомотермична. Длительный период стабильного уровня анизотропии в конце лета и начале осени, очевидно, объясняется преобладанием ветрового воздействия над другими генерирующими факторами. Степень анизотропии полей аномалий существенно зависит от сезонного хода температуры воды.

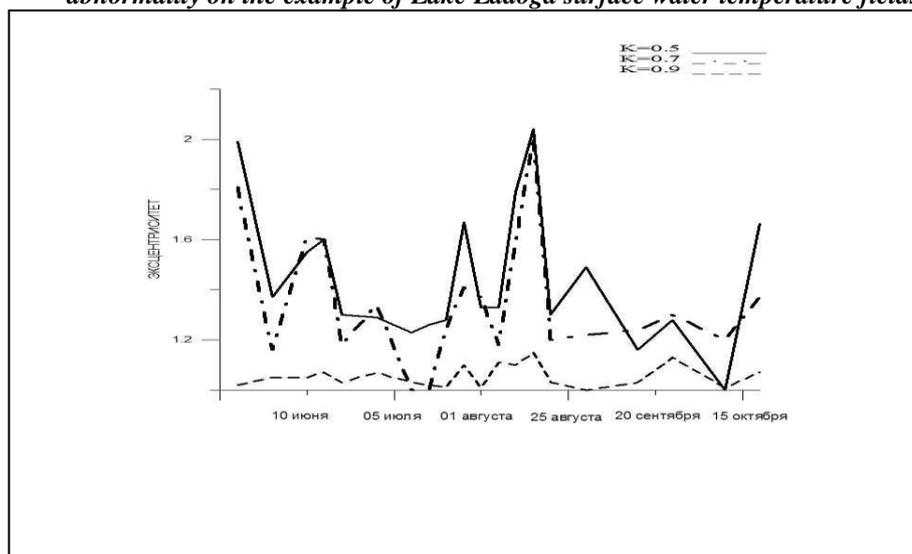


Рис.5. Временной ход эксцентриситетов эллипсов корреляции полей аномалий

Выводы

Таким образом, применение вероятностного подхода и теории случайных функций позволяет количественно оценить степень пространственно-временной аномальности полей лимнических характеристик выбранного масштаба и выявить основные факторы, обуславливающие закономерности рассматриваемого явления. Исследование показало, что аномальность температурных полей и ее изменчивость тесно связаны с закономерностями гидротермического режима Ладожского озера и его особенностями. Полученные характеристики анизотропии и изменчивости следует учитывать при моделировании термического режима озера, сглаживании и экстраполяции параметров при экологическом моделировании и прогнозировании, определении составляющих теплового баланса, оптимизации расположения сети наблюдений. Недоучёт неоднородности температурных полей может привести к ошибочной трактовке количественных и качественных параметров термического режима. Принимая во внимание условие согласованности гидрофизических полей, выводы, полученные на основании анализа поля температуры, могут быть распространены и на другие поля. Выполнение этого условия не зависит от применяемого в исследовании подхода, а определяется объективными факторами, заключенными в самой природе процессов, протекающих в крупных водоемах [6]. Авторы полагают, что предложенная методика может с успехом применяться для оценки аномальности полей различных элементов режима природных объектов, степень изученности которых достаточно велика.

Summary

Real random fields of limnological characteristics are greatly variable due to different scales processes influence. Their typical distributions can be obtained from averaging. However, for a number of tasks knowing typical values is not enough and deviations real fields from typical ones, called anomalies fields, are in need. These fields structure and their variability can be studied within probabilistic approach and random functions theory, which allow estimating the mean value of a characteristic and its correlation function. For this it is necessary:

1. To estimate typical fields of a characteristic (surface water temperature (T_s)).
2. To estimate real fields at certain scale of averaging.
3. To estimate and map anomalies fields.
4. To test significance of differences between real and typical fields.
5. To analyze anomalies values and their spatiotemporal variability statistically.
6. To estimate the range of anisotropy and correlation of anomalies fields.

In the paper on the example of Lake Ladoga T_s fields solution of each of the tasks above is presented on the base of the analytic function describing the typical seasonal temperature changing and the data obtained in situ. The temperature in a defined point of the surface in a certain time of a period τ T_τ can be considered as a sum of the determinate and random components:

$$T_\tau = T_{0\tau} + \Delta T_\tau, \quad (1)$$

where $T_{0\tau}$ characterizes the typical value for the date chosen and the component ΔT_τ is a random deviation of a measured real temperature from the typical one. Having estimated T_τ and $T_{0\tau}$ quantitatively, it is possible to calculate ΔT_τ .

1. Ladoga has been studied by specialists of Russian Academy of Sciences Institute of Limnology since 1956 and its data base contains more than 250 000 measured T values and corresponding information. Here the method was worked out to estimate synoptic abnormality and to avoid influence of spatiotemporal irregularity of measurements distribution over the lake on T averaging. According to it the lake surface was divided with a regular grid into 235 squares with sides 10 km. T_s for each square was approximated with an analytic dependence, a combination of two functions, describing water T temporal change during different hydrological seasons. Typical T_s fields for the certain dates (TTFs) were created with interpolating the obtained data in the mesh points (with the step of the regular grid 5 km).

2 – 3. For creating T_τ spatial distributions thermal vessel surveys, carried out in 3-6 days (synoptic period), were chosen from the data base. The number of measurements of each survey is quite enough for computation and they are distributed relatively regularly throughout the surface. For more precious interpolation in the coastal zone the values of shore-line T_s were estimated by multi-polynomial regression method. The further thermal-data processing was carried out by the technique that was analogous to the method, used for creating Ladoga typical T_s fields for certain dates. As a result real T_s fields (RTFs) and TTFs were created and then ΔT_τ fields were estimated. Let us call deviations ΔT_τ which are higher than $|0,5|^\circ\text{C}$ anomalous. For all the 43 cases considered ΔT_τ values were plotted and anomalies maps were statistically analyzed.

4. In the early stage the analysis of the ΔT_τ maps was aimed to estimating significance of differences between RTFs and TTFs mean characteristics. For this Student and Fisher criteria were used. Student-criteria shows that at significance level 1% differences between RTFs and TTFs mean temperatures are significant for 38 out of 43 cases. Differences between RTFs and TTFs variances were estimated by comparison with the crucial Fisher-criteria parameter value ($F_{cr}=1$). For all the 43 cases $F > F_{cr}$. Thus differences between the fields' statistical characteristics are considered to be significant and not random.

5. The further analysis allowed characterizing Ladoga spatiotemporal abnormality, to determine temperature anomalies values and areas they cover. For each month values of areas with ΔT_τ up to $|5,5|^\circ\text{C}$ were calculated. The interval of $\Delta T_\tau + 0.5 \dots + 1.5^\circ\text{C}$ is predominant. On the whole, positive anomalies prevail. The most anomalous RTFs are observed in July, when T_s does not reach its year highest values yet. The analysis has shown that the most anomalous SWT distributions are typical for the shallower coastal zone, where thermal inertia is not significant and water and air masses transform and take place breezes and high tide phenomena accompanied by down- and upwellings. Here ΔT_τ can exceed 5°C . Within quite deep central Ladoga, which is the most thermal inert, during hydrological spring ΔT_τ values are below $|1,0|^\circ\text{C}$. This is caused by the thermal bar existence, which prevents water masses, separated by it, from interacting. However, after destruction of the thermal bar abnormality of this zone increases. Areas of regions where SWT corresponds to the climatic rate vary from 1% to 44%. On average they cover 20% of the lake. RTFs more often correspond to TTFs in June and August (when typical T covers 24 and 20% of the surface respectively). July is the most anomalous month, only 13% of the lake is not anomalous on average. Such significant abnormality of RTFs in July is caused by unsteady character of hydrological processes while their changing from spring type to summer one after

the thermal bar destruction. Joint analysis of synoptic-scale abnormality of 43 T_s fields has not allowed revealing a zone where T fields are always typical. However, there is a zone situated in the north-west Ladoga where they are rarely anomalous. To sum up, the heterogeneous character of Ladoga RTFs abnormality is caused both weather conditions and morphometrical features.

6. For estimating the rate of anomalies fields' anisotropy their autocorrelation functions were calculated and correlation ellipses were mapped. At the correlation level 0,5 the following ellipses parameters were statistically analyzed: major and minor axes, orientation (the angle between the major axis and west-east direction) and ratio major axes to minor ones, called eccentricity and being a measure of anisotropy rate. As a result an average radius 2,5 km within which anomalies fields are isotropic was estimated ($K=0,9$). Orientation of typical fields' ellipses varies according to hydrological seasons change. Anomalies fields and typical fields ellipses can be oriented both synchronized and a synchronized. It depends on the relation between main forces of these distributions generating which vary between seasons. The patterns of Ladoga spatiotemporal abnormality and its anisotropy, revealed by this study, needs taking into consideration while ecological and thermal regime forecasting and modeling, extrapolation of characteristics values and rationalization in situ measurements. Due to hydro-physical fields coordination patterns of thermal fields can be applied to different components distributions. The methodology presented is recommended for estimating spatiotemporal abnormality of various characteristics fields of natural objects, which typical conditions and features are studied to the right degree.

Литература

1. Казакевич, Д.И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Гидрометеиздат, Ленинград, 1977.
2. Ладожское озеро. Атлас. Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, 2002. с.70 -72.
3. Наumenko, М.А., Каретников, С.Г. Морфометрия и особенности гидрологического режима Ладожского озера. В кн.: Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. Под ред. чл.-корр. В.А. Румянцева и д. б. н. В.Г. Драбковой. Наука, Санкт-Петербург, 2002. с.16 - 49.
4. Колкот Э. Проверка значимости. Статистика, Москва, 1978.
5. Тимофеева, Л.А., Наumenko М.А. Средние и аномальные распределения полей температуры поверхности воды Ладожского озера в период открытой воды. В сб.: Материалы Международной научно-практической конференции "География, природные ресурсы и туристическо-рекреационный потенциал Балтийского региона". Великий Новгород, 11-13 октября 2007. с.23 - 28.
6. Бышев В.И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. Наука, Москва, 2003.