

Министерство образования и науки
Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)

УДК 556.555.4 (282.247.212)

На правах рукописи

Тимофеева Лариса Александровна

АНОМАЛИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА
ДЛЯ ПЕРИОДА ОТКРЫТОЙ ВОДЫ

Специальность 25.00.27 –
гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург 2010

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ)

Научный руководитель:

доктор географических наук, профессор Науменко Михаил Арсеньевич

Официальные оппоненты:

доктор географических наук Рянжин Сергей Валентинович

доктор географических наук Бабкин Владимир Иванович

Ведущая организация: Московский государственный университет,
географический факультет,
кафедра гидрологии суши

Защита состоится “ 18 “ февраля 2010 г в 15 час 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98, ауд. 308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан “ “ января 2010 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
канд. геогр. наук

В.Н. Воробьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Температура воды является одной из основополагающих характеристик физических свойств воды, что чрезвычайно важно – ее неотъемлемой характеристикой. В большинстве случаев она полностью определяет распределение по плотности, а, следовательно, вертикальную устойчивость водных масс пресного озера, возникновение различного рода циркуляционных течений, влияние на дрейфовые течения. Температура поверхности крупных озёр может служить индикатором взаимодействия водной толщи и прилегающих слоёв воздуха, отражать некоторые глубинные процессы и является граничным условием в различных моделях водоёмов. Термическое состояние озер является важнейшим лимитирующим фактором их экосистем, а также определяет многие процессы в вытекающих из них реках. Все вышеперечисленное объясняет непреходящий интерес исследователей к термическому режиму Ладожского озера [Андреев 1875, Молчанов, 1945, Тихомиров, 1982, Науменко и др., 2000, 2002].

Средние (типичные) пространственные распределения температуры воды определяются морфометрией водоёма, физико-географическими и климатическими условиями. В крупных глубоких озёрах термогидродинамические процессы различных пространственно-временных масштабов трансформируют средние сезонные распределения, определяя реальные распределения как температуры, так и других лимнических характеристик. Ладожское озеро хорошо изучено с точки зрения средних термических характеристик и представляет несомненный интерес для изучения аномалий – отклонений реальных величин от средних.

Существующая в Институте озероведения РАН база контактных данных и разработанные специалистами Института методики позволяют исследовать аномальность температурных полей Ладожского озера и выявить ее особенности. Неверная оценка характера изменчивости температурных полей

и недоучёт их неоднородности может привести к ошибочной трактовке количественных и качественных параметров термического режима, особенно в условиях изменяющегося климата [Науменко, 1998].

Актуальность темы

заключается в назревшей необходимости количественного исследования аномальности термических полей поверхности Ладожского озера по данным судовых контактных наблюдений.

Цель и задачи диссертационного исследования

Цель настоящей работы сформулирована, исходя из теоретических и практических задач изучения термического режима Ладоги: получение основных статистических характеристик аномальности температурных полей поверхности Ладожского озера синоптического масштаба за период открытой воды, а также выявление особенностей данного явления.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- выбор, на основе анализа базы данных Института Озероведения, наиболее полных термических съемок поверхности озера, выполненных за синоптический период (от 3 до 6 дней) с мая по октябрь;
- построение типичных полей температуры поверхности Ладожского озера на основе ранее полученных аналитических зависимостей на даты начала пентад;
- расчет и построение реальных полей температуры поверхности на основе данных выбранных термических съемок;
- расчет и построение полей аномалий – отклонений типичных полей от реальных полей;
- оценка значимости различий между статистическими характеристиками реальных и типичных полей;
- получение основных статистических характеристик полей аномалий и выявление пространственно-временных особенностей аномальности температурных полей;

– исследование коррелированности и анизотропии рассматриваемых полей.

Материалы и методы

Для расчета и построения реальных полей температуры поверхности использованы данные 43 термических съемок синоптической продолжительности, выбранных из электронной базы данных Института Озероведения РАН. Типичные поля температуры построены на основе ранее полученных аналитических зависимостей. Аналогичность методик построения типичных и реальных полей позволила рассчитать и построить поля аномалий.

Исследование аномальности и связности термических полей поверхности озера выполнено в рамках вероятностно-статистического подхода и теории корреляционных функций с использованием множественной полиномиальной регрессии и теории проверки статистических гипотез. Графические построения и статистический анализ выполнялись с применением статистико – графических пакетов «Surfer» и «Statistica».

Научная новизна работы

Применение новых подходов анализа и обработки термической информации позволили впервые:

- рассчитать и построить поля аномалий температуры поверхности Ладожского озера как поля случайных отклонений реальной наблюдаемой температуры от ее типичного значения;
- получить количественные характеристики аномальности температурных полей поверхности Ладожского озера и выявить особенности ее пространственно-временной изменчивости синоптического масштаба;
- построить пространственные автокорреляционные функции термических полей Ладоги и проанализировать их параметры для исследования структуры рассматриваемых полей и выявления особенностей их генерации.

На защиту выносятся

– анализ количественных характеристик аномальности температурных полей поверхности Ладожского озера синоптического масштаба за период открытой воды;

– особенности пространственно-временной аномальности полей температуры;

– количественные характеристики коррелированности и анизотропии температурных полей поверхности озера различных пространственных масштабов.

Практическая значимость работы

заключается в возможности применения указанных параметров и особенностей при моделировании температурного режима Ладожского озера, экологическом моделировании и прогнозировании, определении составляющих теплового и водного баланса, рационализации проведения термических исследований.

Апробация работы

Работа в целом была представлена и обсуждена на заседании кафедры гидрологии суши РГГМУ (2009). Промежуточные итоги исследования представлялись в устных докладах на заключительной сессии Ученого Совета РГГМУ (2009), научной сессии, посвященной 90-летию кафедры гидрологии суши Санкт-Петербургского государственного университета (2008), на английском языке на II Симпозиуме по большим европейским озерам (Норрталье, Швеция, 2009).

Результаты диссертационной работы были представлены в докладах с последующими публикациями на заключительной сессии Ученого Совета РГГМУ (2008), Международной научно-практической конференции «География, природные ресурсы и туристско-рекреационный потенциал Балтийского региона» (Великий Новгород, 2007), III школе-конференции молодых ученых «Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана» (Петрозаводск, 2008), молодежной

конференции посвященной III Международному Полярному году (Санкт-Петербург, 2008), Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие и геоэкологические проблемы Балтийского региона» (Великий Новгород, 2009), VII международной научно-практической конференции «Окружающая среда. Технологии. Ресурсы» (Резекне, Латвия, 2009).

Личный вклад автора

разработка новых подходов анализа и обработки информации базы данных Института Озероведения для расчетов и построения реальных термических полей, полей аномалий температуры поверхности Ладожского озера, их пространственных автокорреляционных функций, статистическая обработка результатов построений, обобщение и анализ результатов статистического анализа.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 статей, в том числе одна статья опубликована в журнале по перечню ВАК («Метеорология и Гидрология»– 2009. – № 12 (в печати).

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и библиографического списка литературы. Текст изложен на 116 страницах и включает 2 таблицы, 40 рисунков. Список литературы содержит 89 наименований, из которых 16 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, выбор объекта исследования, формулируются его цель и задачи. Показана новизна постановки решаемых задач для лимнологии и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена характеристике Ладожского озера, истории изучения его термического режима. Обосновывается выбор объекта

исследования с точки зрения степени гидрологической изученности и возможности оценивания аномальности его термических полей.

В разделе 1.1 приводится физико-географическая характеристика Ладожского озера и его бассейна. Крупнейшее в Европе озеро занимает 16 место по площади зеркала (17 872 км²) и 14 по объему (838 км³) [Науменко, 1995] в ряду самых крупных пресноводных водоемов мира и при этом является одним из самых северных среди них. Эти факты определяют особенности его радиационного и термического режима.

В разделе 1.2 описаны некоторые этапы исследования термического режима озера. Цели его изучения, методы и средства изменялись и совершенствовались, начиная с 1858 г., первых научных исследований Ладожского озера, осуществленных под руководством А.П. Андреева (1863, 1865, 1866, 1875). Значительный вклад в изучение термики Ладоги внесли исследования под руководством Ю.М. Шокальского, осуществленные в 1897, 1899 и 1901 гг., Т. Хомена – с 1898 по 1903 гг., И.В. Молчанова, возглавившего работу Ладожской экспедиции в 1930 г. В 1946 г. им были отмечены сложность и своеобразие термического режима озера, его отличие от температурного режима всех больших озер мира [Тепловой режим Ладожского озера, 1968].

Комплексное изучение озера было начато Экспедицией Лаборатории озероведения в 1956 г. Наблюдения производились на станциях семи поперечных разрезов на поверхности и на стандартных глубинах. С 1959 по 1962 гг. на озере было выполнено более 2575 термических станций и более 170 станций в шхерном районе. Основываясь на результатах предшествовавших многолетних исследований и, в большой степени, на результатах Ладожской экспедиции, А.И. Тихомиров сформулировал основополагающие понятия о термике Ладожского озера.

Основные особенности термического режима озера и его годового термического цикла описаны **в разделе 1.3**. Годовой термический цикл был представлен А.И. Тихомировым как последовательность периодов

нагревания и охлаждения – процессов. А.И. Тихомиров отметил основные факторы, определяющие сезонный ход температуры вод озера и его особенности, заложив фундаментальную базу для дальнейшего изучения термического режима Ладоги [Тихомиров, 1982].

В разделе 1.4 раскрывается степень изученности пространственных распределений температуры поверхности Ладоги.

Сложная морфометрия Ладожского озера обуславливает наличие участков акватории, различных по температурному и гидродинамическому режиму, что определяет пространственно-временную неоднородность всех лимнических процессов в озере [Науменко, 1998]. Более того, в крупных глубоких пресноводных озерах в каждый из гидрологических сезонов имеет место синоптическая и мезомасштабная изменчивость полей температуры воды с периодами от нескольких дней до нескольких часов, трансформирующая среднее сезонное распределение характеристик. Следовательно, среднемесячное пространственное распределение температур поверхности озера, представление о котором было получено А.И. Тихомировым [Тихомиров, 1982], не позволяет исследовать синоптическую и мезомасштабную изменчивость термических процессов.

Потребовалось разработать методику получения и анализа средних многолетних (типичных) пространственных распределений температуры воды озера на каждую дату с середины мая по начало ноября. Наличие постоянно пополняющейся компьютерной базы термических данных, которая на настоящий момент содержит около 300 000 данных о термическом режиме и сопутствующей гидрометеорологической информации за период с 1897 по 2007 гг., и создание информационно-диагностической системы позволило решить поставленную задачу.

Сезонный ход температуры поверхности в каждом из 235 квадратов, на которые была разделена акватория озера, был аппроксимирован аналитической зависимостью, представляющей собой комбинацию двух функций, описывающих временной ход температуры поверхности в течение

различных гидрологических сезонов. С помощью ИДС возможно получить типичные температуры поверхности воды каждого из квадратов. В результате можно получить пространственные распределения типичной температуры поверхности озера на любую дату [Гузиватый и др. 2002].

В разделе 1.5 приводятся данные об изученности аномальности температурных полей крупных водоемов. Объекты гидросферы являются достаточно чувствительными звеньями гидрологического цикла. Реакция озер на какие-либо воздействия индивидуальна, поскольку озера – продукт не только климата, но и своего собственного состояния, определяемого условиями прошлого и настоящего [Адаменко, 1985]. Более того, температура воды одновременно является причиной и следствием метеорологического, динамического и биологического режима водоемов [Гречушникова, 2002].

Аномалии формируются под воздействием как короткопериодных атмосферных процессов высокой интенсивности [Федоров, Гинзбург, 1988], так и внутренних изменений полей. Задачи, связанные с изучением аномалий поверхностных полей температуры, были впервые сформулированы океанологами. Аномалией принято называть разность между наблюдаемой (реальной) величиной характеристики и ее нормальным (типичным) значением [Словарь иностранных слов, 1989]. Вопросы, касающиеся генерации, времени жизни аномалий температуры поверхности, эффектов, производимых ими под поверхностью, механизма их затухания требуют дальнейших исследований. Для этого могут быть применены и дистанционные методы, позволяющие детально исследовать быстротечные явления с пространственными размерами до десятков километров и характерным временем жизни несколько суток [Бычкова и др., 1988].

Во второй главе приводятся сведения об исходных данных для расчета и построения пространственных аномалий температуры поверхности озера. Излагаются теоретические основы, методы и средства исследования аномальности температурных полей.

Анализ случайных полей заключается в определении статистических характеристик (пространственное среднее, корреляционная функция, дисперсия и т. д.). Построение пространственных изолиний или карт является одной из наиболее важных практических задач анализа. В работе построение карт производилось с использованием статистико-графического пакета “Surfer”.

В разделе 2.1 описаны основные подходы и теоретические положения, применявшиеся для анализа аномальности термических полей.

Структура гидрометеорологических полей, в силу их изменчивости, изучается в рамках вероятностного подхода, основанного на рассмотрении особенностей не отдельных мгновенных полей, а некоторых осредненных свойств статистической совокупности реализаций поля [Казакевич, 1989]. В данной работе реализации поля представляют собой термические экспедиционные съемки акватории Ладоги. Наибольший интерес при статистическом изучении случайных полей представляет характеристика их аномалий.

Для изучения синоптической пространственной неоднородности температурного поля поверхности озера конкретной термической съёмки, выполненной в течение нескольких суток τ , температуру в конкретной точке поля T_τ можно выразить в виде суммы детерминированной и случайной составляющей:

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

где T_τ – температура поля поверхности озера в конкретной точке конкретной термической съёмки (наблюденная величина), °С;
 $T_{от}$ – детерминированная компонента (типичная величина), °С;
 ΔT_τ – случайное отклонение наблюдаемой величины от типичной, °С.

Для получения первой компоненты поля часто используют процедуру пространственно-временного осреднения. Масштабы осреднения зависят от особенностей решаемых задач и целей исследования. В работе эта

компонента вычисляется аналитически с использованием полученной ранее зависимости, представляющей собой комбинацию двух функций, и называется типичным значением температуры поверхности для выбранной даты. Компонента T_{τ} находится по данным термических съемок.

Применение аналогичной методики для расчета реальных наблюдаемых и типичных температур позволяет сравнить их, вычислить отклонение ΔT_{τ} . Отклонения ΔT_{τ} , превышающие $|0.5|$ °C, назовем аномальными. Выбранная величина не превосходит погрешности измерений и максимально возможное изменение температуры поверхности за период съемки – синоптический период. Если ΔT_{τ} меньше $|0.5|$ °C, то реальное поле соответствует типичному.

В разделе 2.2 излагается методика построения типичных полей температуры на любую дату периода открытой воды. Она позволяет определить синоптическую аномальность и при этом избежать влияния нерегулярного распределения наблюдений в озере во времени и пространстве на пространственное осреднение температуры поверхности [Науменко и др., 2000]. Для этого поверхность озера была разделена равномерной сеткой на 235 квадратов со стороной равной примерно 10 км. Величина ячейки сетки выбрана с учетом двумерной пространственной автокорреляционной функции термических съемок поверхности озера [Науменко, 1996].

Сезонный ход температуры поверхности каждого квадрата был аппроксимирован аналитической зависимостью, представляющей собой комбинацию двух функций, описывающих временной ход температуры воды в течение различных гидрологических сезонов. Для димиктического Ладожского озера ее сезонный ход является ассиметричным, поскольку нагревание поверхности озер умеренной зоны происходит несколько быстрее, чем охлаждение [Naumenko et al., 1998]. В результате интерполирования были построены 43 типичных поля температуры поверхности озера (рисунок 1 а) на даты начала пентад, на которые затем были построены реальные термические поля.

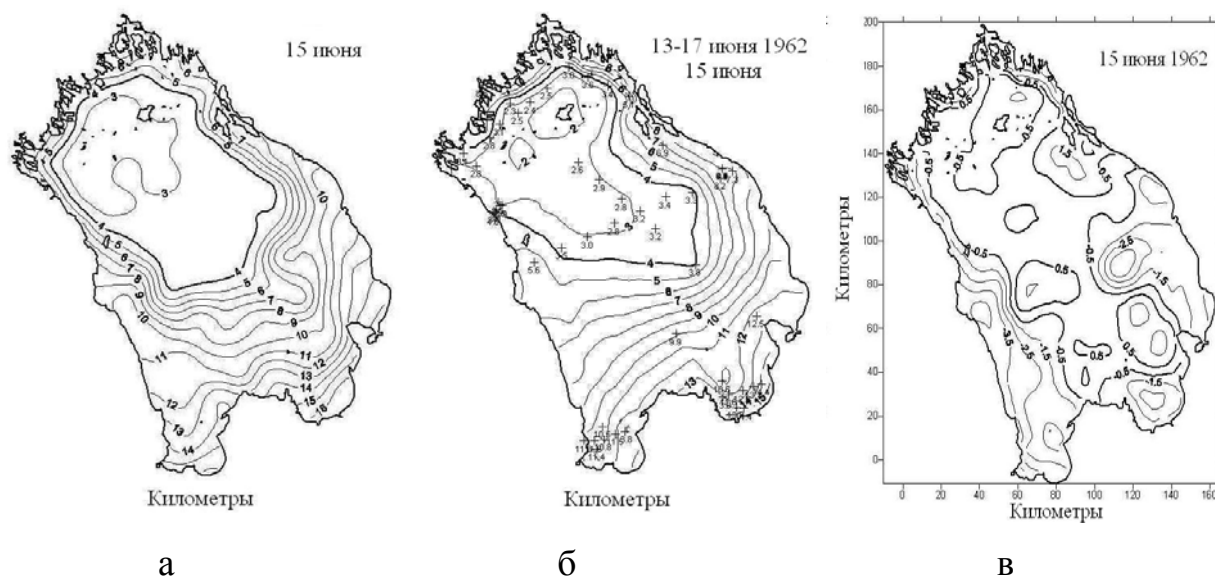


Рисунок 1 – Пространственные распределения:

- а – 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. (Знаком + обозначены термические станции, положение термобара соответствует 4 – х градусной изотерме)

Построение реальных распределений температур поверхности описано в **разделе 2.3**. Для этого из базы данных Института озероведения РАН были выбраны 43 судовые съемки, выполненные за период открытой воды с 1960 по 2003 гг. в течение от 3 до 6 суток, т.е. за синоптической период. Самая ранняя съемка проведена с 17 по 20 мая 1989 г, самая поздняя – с 20 по 24 октября 1961 г, распределение их по месяцам неравномерно (рисунок 2). Все съемки имели достаточное для компьютерной обработки число термических станций, распределенных относительно равномерно по акватории озера. Количество станций изменяется от 16 до 255 в зависимости от гидрологического сезона и метода измерения температуры (буксировка или выполнение термических станций). Для более корректного интерполирования в прибрежной зоне температура воды на нулевой изобате определялась методом полиномиальной регрессии.

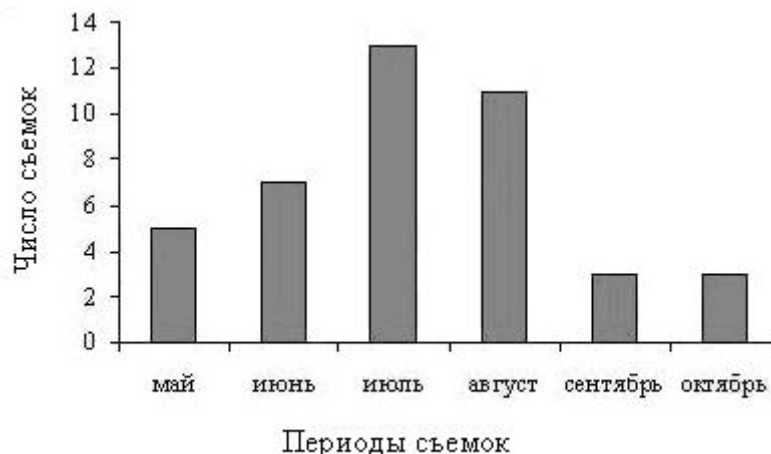


Рисунок 2 – Распределение термических съеомок по месяцам

Дальнейшая обработка термических данных выполнялась по методике, аналогичной методике построения типичных пространственных распределений температуры поверхности Ладоги на конкретные даты.

В результате были рассчитаны 43 поля реальных температур (рисунок 1 б). Сравнив реальные и типичные поля, вычислим отклонения ΔT_{τ} . Значения ΔT_{τ} для всех 43 случаев картировались с целью их последующего статистического анализа (рисунок 1 в).

В Разделе 2.4 описана процедура проверки значимости различий между реальными и типичными температурными полями. Для определения однородности средней двух выборок применялся критерий Стьюдента, а для определения однородности дисперсий – критерий Фишера [Колкот, 1978]. Исследуемые выборки являются независимыми, случайными. Распределение значений температуры поверхности озера не во все гидрологические сезоны соответствует нормальному закону в связи с особенностями ее годового хода. Однако в гидрометеорологии такое несоответствие не служит препятствием для использования вышеуказанных критериев для оценки различий статистических характеристик исследуемых выборок [Рождественский, Чеботарев, 1974].

Раздел 2.5 посвящен корреляционному анализу, позволяющему оценить масштабы коррелированности и анизотропии исследуемых полей.

Данный метод исследования структуры случайных полей лимнологами применяется довольно редко. Приводятся сведения о ранее определенных корреляционных связях между типичной температурой поверхности озера, координатами и глубинами (рисунок 3).

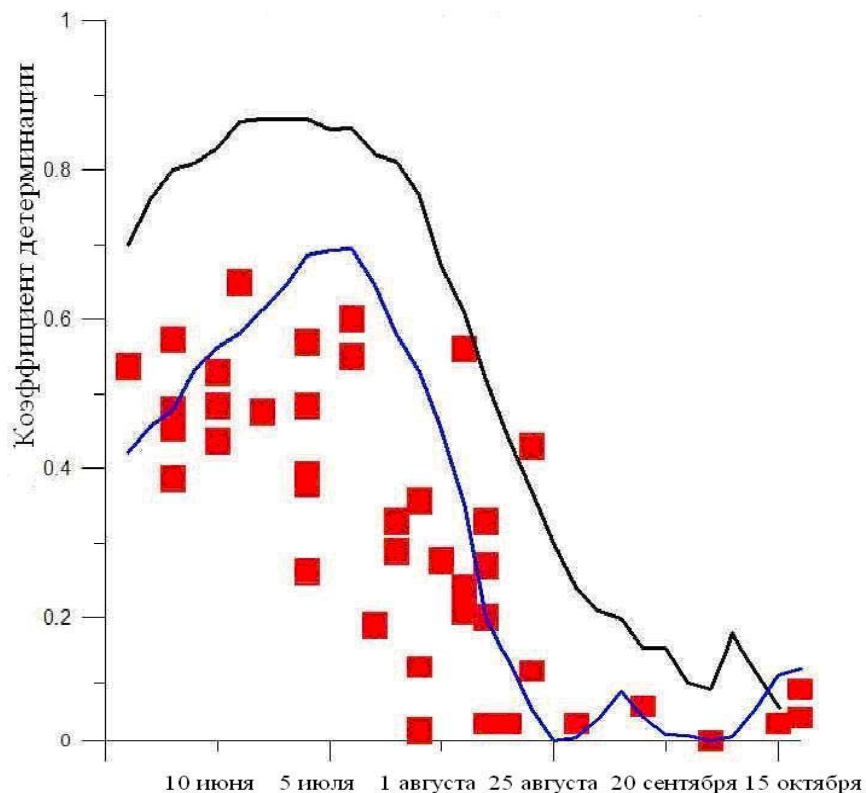


Рисунок 3 – Сезонная изменчивость коэффициентов детерминации между: — типичной температурой поверхности воды, координатами и глубиной места; — типичной температурой поверхности воды и глубиной места; ■ реальной температурой поверхности воды и глубиной места

Данные зависимости свидетельствует об определяющем влиянии глубины на эволюцию термического состояния поверхности Ладоги с мая до середины июля. В период устойчивой стратификации такое влияние слабо и неоднородности термических полей формируются под влиянием синоптической ситуации над акваторией озера [Науменко, Каретников, 2002].

Для анализа исследуемых явлений важна и другая имевшаяся

зависимость – пространственная автокорреляционная функция
распределения глубин озера (рисунок 4).

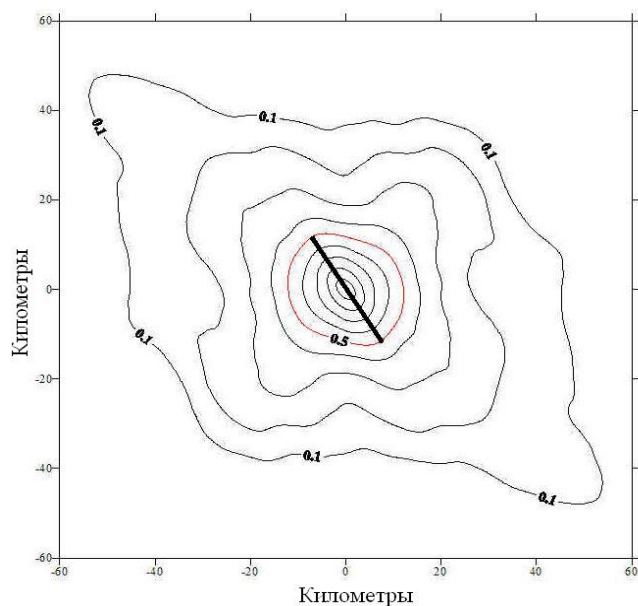


Рисунок 4 – Автокорреляционная функция распределения глубин и большая ось симметрии

Ориентация большой оси симметрии составляет 60° для уровня корреляции $K = 0.5$. Изотропия, в силу крайне неравномерного распределения глубин озера, отсутствует.

Для всех исследуемых полей рассчитаны пространственные автокорреляционные функции:

$$C(n, m) = \frac{1}{N^2 \cdot C(0,0)} \sum_{i=0}^{N-n-1} \sum_{j=0}^{N-m-1} T(i, j) \cdot T(i+n, j+m), \quad (2)$$

- где C – значение автокорреляционной функции;
 N – число информационных точек поля $T(i, j)$;
 T – температура, $^\circ\text{C}$;
 i, j – номера информационных точек поля;
 n, m – шаг расчета.

В связи с анизотропией полей формы, размеры и ориентация построенных эллипсов корреляции весьма разнообразны (рисунок. 5).

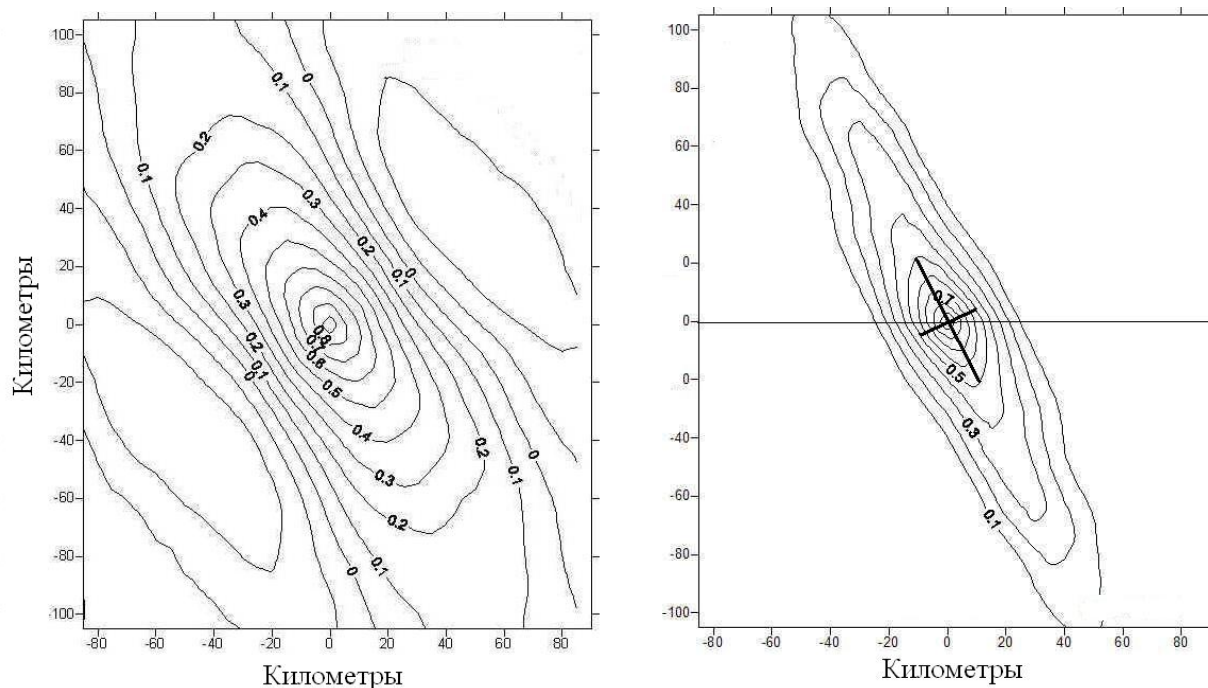


Рисунок 5 – Примеры двумерных автокорреляционных функций термических полей

Статистически анализировались следующие параметры: большая и малая ось, эксцентриситет (отношение большой оси к малой) и ориентация эллипса – отклонение большой оси от направления З – В по часовой стрелке (см. рисунок 5). Эксцентриситет служит мерой анизотропии рассматриваемого поля, и равен 1.0, если оно изотропно. Ориентация показывает направление максимальной коррелированности параметров поля, длина большой полуоси – масштаб пространственной коррелированности.

Основное содержание **третьей главы (разделы 3.2 и 3.3)** посвящено представлению результатов статистического анализа аномальности и связности температурных полей и их обсуждению.

В **Разделе 3.1** приведены результаты проверки однородности исследуемых полей. По критерию Стьюдента при 5 % уровне значимости разности между средними величинами температуры реальных и типичных полей оказались значимы для 38 из 43 проанализированных случаев. Значения параметра $F > F_{\text{крит.}}$ для всех рассматриваемых пар при уровне значимости 5 % . Следовательно, различия их статистических характеристик

не случайны и рассматриваемые выборки не принадлежат одной генеральной совокупности.

В разделе 3.2 приведены основные характеристики аномальности температурных полей. Были вычислены площади зон акватории озера, соответствующие типичной температуре поверхности и отличающиеся от таковой до $|5.0|$ °С (рисунок 6). Преобладающим является интервал отклонений температуры от +0.5 °С до +1.5 °С. В целом положительные аномалии температуры преобладают над отрицательными.

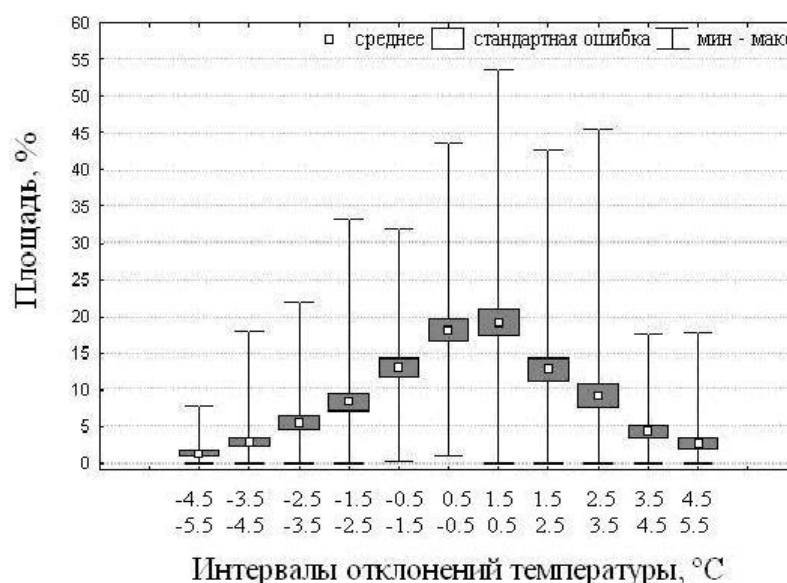


Рисунок 6 – Статистические характеристики распределения отклонений реальных температур поверхности воды Ладожского озера от их типичных значений

Типичное распределение температуры поверхности воды Ладожского озера в среднем занимает не более 20 % его площади. Температура остальной акватории может отклоняться от типичной до $|5.0|$ °С, а в мелководном районе – до $|9.0|$ °С. Площадь зон с типичной температурой изменяется от 1 % до 44 % общей акватории (рисунок 7). Полученные результаты подтверждают существующее мнение о том, что в крупных озерах редко наблюдаются типичные поля элементов их режима [Бояринов, Петров, 1991].

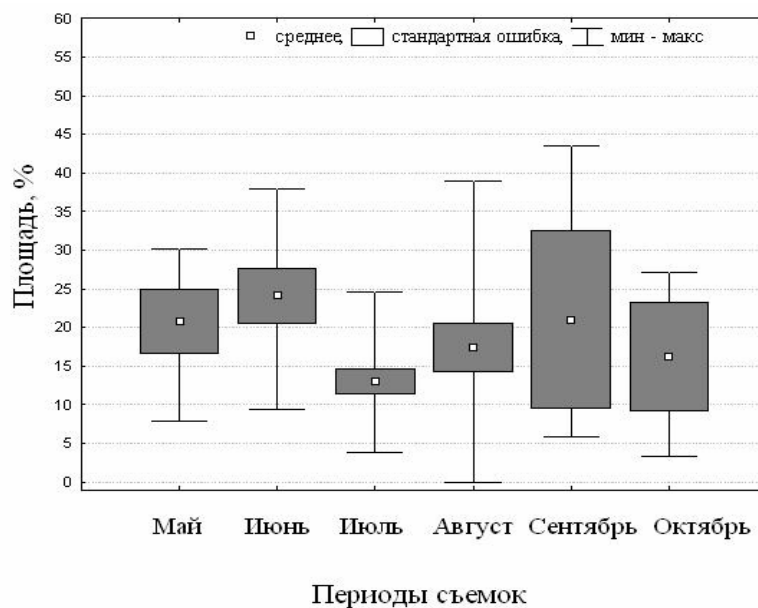


Рисунок 7 – Статистические характеристики распределения площадей с типичными средними температурами поверхности воды Ладожского озера по месяцам

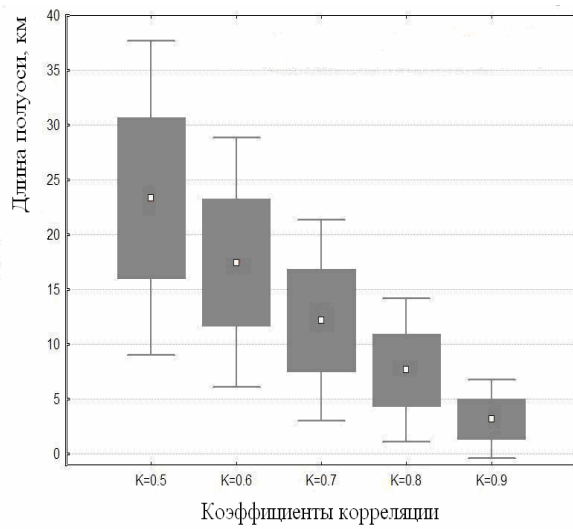
В разделе 3.3 охарактеризована временная аномальность полей температур поверхности озера. Для всех месяцев исследуемого периода были рассчитаны площади зон, температура которых соответствует типичной. Таким образом удалось определить, что июль является самым аномальным из рассмотренных месяцев. Только 13% поверхности озера в среднем не аномально, что почти в полтора раза меньше соответствующего значения для мая, июня и августа, наименее аномальных месяцев (см. рисунок 8).

В разделе 3.4 изложены результаты исследования пространственной аномальности и ее особенности. Наиболее аномальным распределением температуры поверхности характеризуется прибрежный мелководный район, обладающий минимальной тепловой инерцией. Это зона трансформации воздушных и водных масс, где наблюдаются бризы и стонно-нагонные явления, сопровождающиеся апвеллингами и даунвеллингами. Здесь отклонения реальной температуры от типичной могут достигать $|9.0|$ °C. Над значительными глубинами центральной Ладоги, наиболее

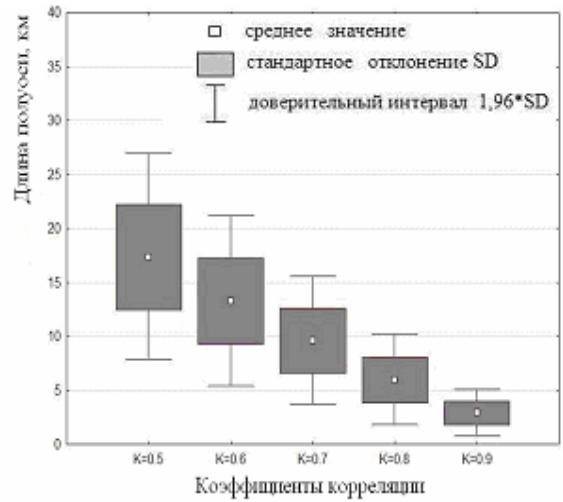
теплоинертной, в период гидрологической весны отклонения не превышают $|1.0|$ °С. Это обусловлено существованием термического бара, препятствующего обмену водных масс, разграниченных им. После разрушения термобара аномальность глубоководного района увеличивается.

Совместный анализ полей аномалий синоптического масштаба всех 43 съёмов не позволил выявить район озера, где всегда наблюдается типичное распределение температуры поверхности. Однако в С – З части Ладоги на 33 картах аномалий имеется зона с типичной температурой. Это, возможно, объясняется как наиболее продолжительным существованием здесь термобара, так и относительной устойчивостью системы течений между островами архипелагов. Неоднородный характер пространственно-временной аномальности температурных полей поверхности Ладоги обусловлен как погодными условиями, внешними возмущениями синоптического масштаба, так и морфометрическими особенностями рассматриваемого водоема.

Раздел 3.5 посвящен анализу связности температурных полей в рамках теории корреляционных функций. В **подразделе 3.5.1** характеризуется их пространственная коррелированность. Статистически обработаны длины больших полуосей корреляционных эллипсов (рисунок 8) и сопоставлены их средние значения для различных полей при одном и том же коэффициенте корреляции. Показано, что реальное температурное поле обладает большей коррелированностью, чем поле аномалий, но менее коррелированно, чем типичное поле. Масштаб коррелированности полей при $K = 0.9$ практически не изменяется во времени. При меньших K он изменяется в соответствии со сменой гидрологических сезонов для реальных полей и полей аномалий. Ориентация эллипсов показывает направление наибольшей коррелированности полей (рисунок 9 б), а также указывает на преобладающие факторы их генерации и на соотношение между ними.

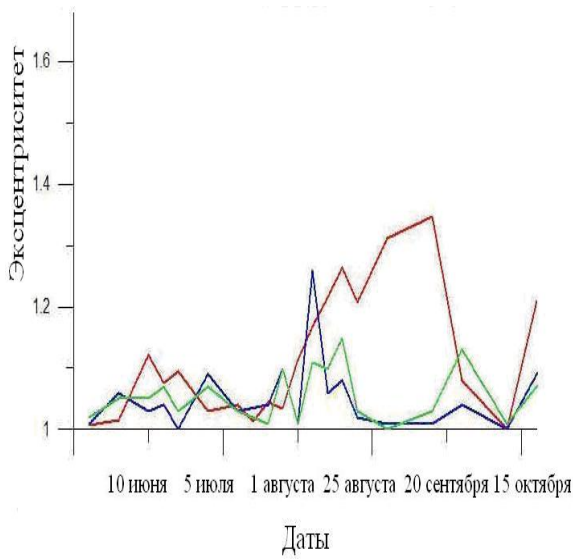


а

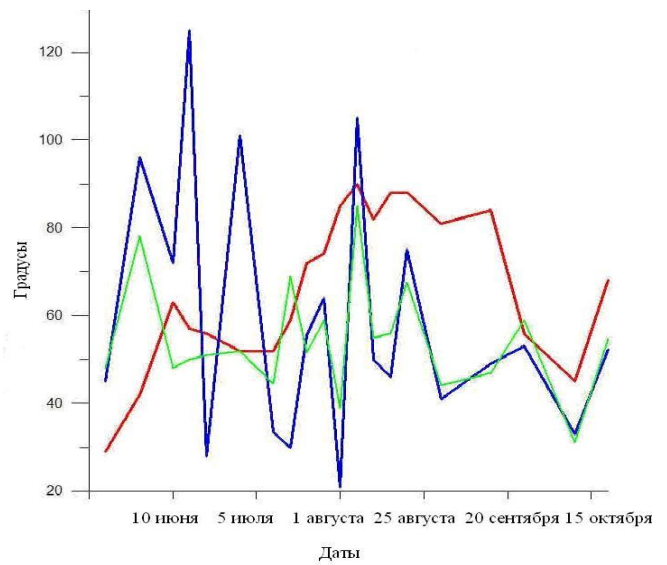


б

Рисунок 8 – Статистические характеристики больших (а) и малых (б) полуосей автокорреляционных эллипсов реальных полей



а



б

- типичные поля температуры поверхности;
- реальные поля;
- поля аномалий

Рисунок 9 – Сезонное изменение: а – степени анизотропии ($K = 0.9$); б – ориентации эллипсов корреляции:

Анализ преобладающей в различные гидрологические сезоны ориентации эллипсов показал, что она, как и степень связности

рассматриваемых полей в целом, зависит как от характерных особенностей Ладоги, так и от синоптических процессов над акваторией.

В подразделе 3.5.2 изложены результаты исследования анизотропии термических полей. Отношение средних длин больших и малых полуосей представляет собой меру анизотропии: в среднем типичные распределения изотропны в радиусе 4 км, реальные – 3 км (см. рисунок 8), поля аномалий – 2.5 км при $K = 0.9$. Знание масштабов изотропии упрощает описание случайного поля и является необходимым условием при решении ряда задач гидрофизики и гидродинамики [Казакевич, 1977].

Термический режим всех типов полей близок к изотропному до середины июля ($K = 0.9$) (рисунок 9 а). Реальные поля и поля аномалий наиболее изотропны перед началом осеннего охлаждения.

Обсуждение некоторых результатов исследования представлено в **Разделе 3.6.**

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы, диссертационной работы:

– на основе анализа разновременных съёмок Ладожского озера с мая по ноябрь показано, что типичное распределение температуры поверхности воды Ладожского озера в период открытой воды практически занимает не более 20 % площади озера и изменяется от 1 % до 44 %. Температура остальной акватории отклоняется от типичной до $|5|$ °С, а в мелководном районе до $|9|$ °С. Преобладает интервал отклонений температуры от +0.5 °С до +1.5 °С. В течение периода открытой воды положительные аномалии температуры превалируют над отрицательными;

– самым аномальным из рассмотренных месяцев является июль – 13 % поверхности озера в среднем не аномально. Июнь наименее аномален, в среднем 24 % акватории термически типичны;

– реальные температурные поля в мелководной прибрежной зоне озера могут резко отличаться от типичных в течение всего периода открытой воды. В глубоководной зоне в период гидрологической весны отклонения не

превышают $|1.0|$ °С. Это обусловлено существованием термического бара, после разрушения которого аномальность глубоководного района увеличивается. В северо-западной части озера находится зона, где поля температуры поверхности редко аномальны;

– в среднем, пространственные масштабы коррелированности ($K = 0.6$) значений температур типичных полей превышают соответствующие масштабы для реальных полей на 10 %, и полей аномалий - на 30 %. Сезонный ход масштаба коррелированности не выражен для полей всех типов при $K = 0.9$ и различен для различных полей при меньшей коррелированности. Направление максимальной пространственной коррелированности полей изменяется соответственно изменению основных факторов их генерации;

- изотропия наблюдается для типичных распределений в радиусе 4 км, для реальных – 3 км, для полей аномалий – 2.5 км ($K = 0.9$). Исследуемые поля близки к изотропным пока существует термобар. Поля аномалий и реальные поля наиболее изотропны в период максимального теплосодержания водной толщи, а типичные – в период их наиболее тесной связи с координатами и глубинами.

Список публикаций по теме диссертации:

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в перечень ВАК

1 Аномалии полей температуры поверхности воды Ладожского озера синоптических масштабов // Метеорология и гидрология.–2009.–№ 12 (в печати) (Соавтор М.А. Науменко).

Статьи, опубликованные в периодических изданиях

2 Пространственное распределение температуры поверхности Ладожского озера в период открытой воды: средние и аномальные

величины // Учёные записки.–СПб.: Изд. РГГМУ, 2008.–Вып. 7.–С.29 – 35 (Соавтор М.А. Науменко).

Материалы конференций

3 Средние и аномальные распределения полей температуры поверхности воды Ладожского озера в период открытой воды // География, природные ресурсы и туристско-рекреационный потенциал Балтийского региона: Материалы Международной научно-практической конференции.– Великий Новгород, 2007.–С.23 – 28 (Соавтор М.А. Науменко).

4 Аномальность температурных полей поверхности Ладожского озера в период открытой воды // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана; Материалы III Региональной школы-конференции молодых ученых.–Петрозаводск, 2008.–С.9 – 13. (Соавтор М.А. Науменко).

5 Температура поверхности Ладожского озера как индикатор изменений климата // Материалы конференции в рамках III Международного полярного года.–СПб.: Изд. РГГМУ, 2008.–С.151 – 153. (Соавтор М.А. Науменко).

6 Пространственная связность температурных полей поверхности Ладожского озера // Устойчивое развитие и геоэкологические проблемы Балтийского региона: Материалы Международной научно-практической конференции.–Великий Новгород, 2009.–С.90 – 95 (Соавтор М.А. Науменко).

7 Методика оценки аномальности пространственных распределений лимнических характеристик на примере полей температуры поверхности воды Ладожского озера // Окружающая среда. Технологии. Ресурсы; Материалы 7^{ой} Международной научно-практической конференции. Т. II.–Резекне, Латвия, 2009.–С.35 – 42 (Соавтор М.А. Науменко).