

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)

На правах рукописи  
УДК [551.511.32:556.55].072

Шульга Маргарита

**Представление озер в моделях погоды и  
климата: внешние параметры, объективный  
анализ температуры поверхности воды и  
верификация**

Специальность: 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

д. г. н., проф. каф. Метеопрогнозов

А. И. Угрюмов

Научный консультант:

к. ф.-м. н., научный сотрудник Финского

Метеорологического Института, г. Хельсинки

Е. В. Курзенева

Санкт-Петербург 2015

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор  
Угрюмов Александр Иванович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук  
Курзенева Екатерина Владимировна

Официальные оппоненты: Поздняков Дмитрий Викторович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке, проф., руководитель группы водных экосистем научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена»

Степаненко Виктор Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Озероведения Российской академии наук (ФГБУН ИНОЗ РАН)

Защита диссертации состоится « 25 » февраля 2016 г. в 17 часов 00 мин на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского Государственного Гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан « 20 » января 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Кандидат физико-математических наук, доцент

Л.В.Кашлева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Озера влияют на атмосферный пограничный слой, на локальную погоду и климат. Это влияние должно учитываться в гидродинамических моделях атмосферы путем параметризации и/или путем задания температуры поверхности воды из измерений (которая в этом случае грубо считается постоянной в течение срока прогноза). Параметризация озер предполагает использование озерных моделей, чаще всего это 1-мерные или  $\frac{1}{2}$ -мерные модели, например, FLake (Mironov, D. *Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model / D. Mironov // COSMO Technical Report 11. – 2008. – P. 1-41.*), LAKE (Stepanenko, V.M. *First steps of a Lake Model Intercomparison Project: LakeMIP / V.M. Stepanenko, S. Goyette, A. Martynov, M. Perroud, X. Fang and D. Mironov // Bor. Env. Res. № 15. – 2010. – P. 191-202.*), Hostetler (Hostetler, S.W. *Interactive coupling of a lake thermal model with a regional climate model / S.W. Hostetler, G.T. Bates and F. Giorgi // J. Geophys. R., Vol. 98D. – 1993. – P. 5045-5057.*).

Все озерные модели требуют внешних параметров, основным параметром – глубина озер. Глубина должна быть задана на сетке точек, во всей области интегрирования. Чтобы модель можно было установить на любую область интегрирования, необходим глобальный набор данных о глубине озер. База данных о глубине озер описана в работе (Kourzeneva, E., Asensio, H., Martin, E., Faroux, S. *Global gridded dataset of lake coverage and lake depth for use in numerical weather prediction and climate modelling. TellusA, 2012.*). Однако существует большое количество озер, глубина которых не была измерена. **Для таких озер необходимо оценивать глубину косвенными методами, например, по геологическим условиям происхождения озер в данном регионе.**

Температура поверхности воды также может быть задана из измерений, инструментальных или спутниковых. Эти данные также нужны для инициализации озерной модели. Данные необходимо проинтерполировать из точек измерений на модельную сетку. Для этого можно использовать метод оптимальной интерполяции. **Однако для его применения необходимы новые знания о статистической структуре полей озерной воды.**

Исследование ошибок озерных моделей необходимо для многих целей, например, для задания модельной ошибки в объективном анализе или для верификации косвенных оценок глубины. Модельные ошибки зависят от сезона, географического региона, характеристик озера и его режима, а также от допущений и упрощений самой модели. Ошибки озерной модели FLake, используемой в качестве параметризации во многих атмосферных моделях, исследовались во многих работах, **однако связь их с режимом озера еще не исследована.**

Все перечисленные выше задачи имеют междисциплинарный характер. Они поставлены метеорологическим сообществом (прогностическими центрами и организациями по исследованиям погоды и климата), оно является основным пользователем продукта и определяет основные требования к его свойствам. Но для выполнения этих задач необходимо привлекать знания из гидрологии и гидрогеологии.

#### **Основные цели диссертационной работы:**

- получение косвенных оценок глубин по информации о геологическом происхождении озер Земного шара;
- изучение статистической структуры полей температуры поверхности озерной воды по инструментальным измерениям;
- изучение ошибок моделирования температуры поверхности воды для различных термических режимов озера.

#### **Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:**

- выделены регионы, однородные с точки зрения факторов, влияющих на геологическое происхождение озер. Получены оценки типичной глубины озер в выделенных регионах. На основе этих оценок сгенерирована новая, улучшенная версия базы данных о глубинах озер. Проведена верификация полученных оценок по новым данным измерений глубин для территории Финляндии;
- получены структурные и автокорреляционные функции полей температуры поверхности воды по инструментальным измерениям на озерах Финляндии, а также оценены ошибки наблюдения;
- изучены ошибки моделирования температуры поверхности воды озерной моделью FLake при разных термических режимах (на примере озера Кюувеси в Финляндии).

#### **Методика исследования включала в себя:**

- изучение по литературным источникам типов озерных котловин в зависимости от их возраста и происхождения, а также от географического региона;
- оцифровку тектонической карты мира и различных геологических карт и их наложение с использованием геоинформационных систем для выделения регионов с однородным происхождением озерных котловин;
- разработку программного комплекса на языке FORTRAN для распределения озер по выделенным геологически однородным регионам и статистической обработки данных об их глубинах, для получения на их основе экспертных оценок (с учетом внешнего вида озер по картам

GoogleMap). Разработку программного комплекса для генерации новой, улучшенной версии базы данных о глубинах озер;

- статистическую обработку данных измерений температуры поверхности воды озер Финляндии, представленных Финским Институтом Окружающей Среды (SYKE);
- моделирование с помощью озерной модели FLake и статистическую обработку модельных ошибок.

### **Научная новизна**

- Получены новые оценки типичных глубин озер с различным геологическим происхождением для всего Земного шара и на их основе сгенерирована новая, улучшенная глобальная база данных о глубинах озер.
- Получены новые структурные и автокорреляционные функции для полей температуры поверхности озерной воды.
- Получены новые оценки ошибок модели FLake, зависящие от сезона года и термического режима озера.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Использование новых оценок глубин озер в моделировании погоды и климата позволит лучше понять географические аспекты вклада физических процессов взаимодействия атмосферы с озерами. Использование их в оперативном гидродинамическом моделировании позволит улучшить качество прогнозов локальной погоды. В настоящее время новая версия базы внедрена во многих прогностических центрах и организациях по исследованиям погоды и климата (ECMWF, Meteo-France, консорциумах HIRLAM, COSMO, UKMO, ALADIN, Rossby-Centre, модели ИВМ-РАН и т. д.).

Использование новых автокорреляционных функций позволит улучшить результаты объективного анализа температуры поверхности озерной воды. Эти функции будут внедрены в прогностическую систему HARMONIE.

Новые оценки модельных ошибок могут быть использованы при разработке системы ассимиляции данных, а также могут быть полезны при решении обратных задач моделирования.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- улучшенная с помощью новых оценок глобальная база данных о глубинах озер для целей атмосферного моделирования с разрешением  $\approx 1$  км (30 секунд в географических координатах);

- результаты исследования статистической структуры полей температуры поверхности озерной воды – новые структурные и автокорреляционные функции, оценки ошибок измерения;
- результаты исследования ошибок озерной модели FLake в зависимости от сезона / термического режима озера.

### **Обоснованность и достоверность результатов**

Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена применением апробированных моделей, а также аргументированностью исходных положений, непротиворечивостью рассуждений, корректным использованием математического аппарата.

### **Личный вклад автора**

Все положения, выносимые на защиту, основаны на результатах исследований, проведенных автором самостоятельно.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

- на международном семинаре «Третий семинар: Параметризация озер в моделях погоды и климата» («The 3<sup>d</sup> workshop on "Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction and Climate Modelling"») с докладом на тему: «Оценки средней глубины для озер Бореальной зоны» («Estimations of mean lake depth for Boreal lakes»), г. Хельсинки (Финляндия), сентябрь 2012;
- на 7-ом Всероссийском Гидрологическом Съезде, 5-ой пленарной сессии: «Состояние и развитие системы гидрологических наблюдений, информационное обеспечение потребителей» со стендовым докладом на тему «Оценки характеристик озер для целей численного моделирования», г. Санкт-Петербург (Россия), ноябрь 2013;
- на научных семинарах в Финском Метеорологическом Институте (FMI), г. Хельсинки (Финляндия), май 2014 и июль 2015;
- на международном семинаре «Четвёртый Семинар: Параметризация озер в моделях погоды и климата» («The 4<sup>th</sup> Workshop on "Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction and Climate Modelling"») с докладом на тему: «Состояние и прогресс в разработке Глобальной Озерной Базы Данных» («Status and progress in Global Lake Database developments»), г. Эвора (Португалия), май 2015;
- на научном семинаре «Четвертая летняя школа: Ассимиляция данных и ее применение в Океанографии, Гидрологии, Рисках и Безопасности и Реконструкция Водных объектов» («The 4<sup>th</sup> Summer school on "Data Assimilation and its applications Oceanography, Hydrology, Risk & Safety and

Reservoir Engineering"») с докладом на тему: «Параметризация озер в моделях погоды и климата: Глобальная Озерная База Данных» («Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction and Climate Modelling: Global Lake Database»), г. Брасов (Румыния), июль 2015.

### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, четырех основных глав и заключения. Объем работы 202 страницы, в том числе 55 рисунков и 20 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 105 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Также сформулированы цели и поставлены задачи исследования.

В **первой главе** представлен обзор исследований влияния озер на погоду и климат. В гидродинамических моделях атмосферы температура поверхности озерной воды является нижним граничным условием для атмосферной модели и интерфейсом между атмосферной моделью и моделью озера. В пункте 1.3 дается схема представления озер в моделях атмосферы.

Озёра влияют на погоду и климат Земли, это влияние очень разнообразно и прослеживается на разных пространственно-временных масштабах. В региональном и локальном масштабе, влияние озёр носит сезонный характер – обычно озера являются источниками тепла осенью и стоками летом, а также вызывают увеличение количества твердых осадков зимой, могут быть причиной сильных снегопадов. На побережьях озёр может возникать бризовая циркуляция, определяющая погоду в близлежащих городах. Заметное влияние на локальную погоду и климат озера оказывают в силу своих уникальных физических характеристик, которые сильно контрастируют с характеристиками окружающей земной поверхности. Влияние озёр может иметь и глобальный характер – так, термокарстовые озера являются источниками парниковых газов (метана и углекислого газа), которые, в свою очередь, могут влиять на глобальный климат. Стоит отметить, что большая часть исследований о влиянии озёр на атмосферные процессы посвящена крупным и глубоким озерам и их окрестностям, таким как Великие озера, Большое Солёное озеро и озеро Виктория. Исследований, посвященных влиянию малых и неглубоких озер на погоду и климат значительно меньше.

Больше всего в научной литературе освещены случаи, когда наличие озер вызывало сильные снегопады. Снегопады наблюдаются в озерных областях северных районов и районах умеренного климата – в холодные сезоны года относительно теплая вода нагревает и увлажняет холодную воздушную массу над озером, что приводит к увеличению количества осадков на подветренных берегах озёр. Тропическое озеро Виктория сильно влияет на атмосферную стратификацию и циркуляцию. Влияние это проявляется в интенсивных ночных конвективных осадках. Это обусловлено совместным влиянием орографии и бризовой циркуляции. Ночью восходящие конвективные потоки над тёплой поверхностью воды усиливаются за счёт орографических эффектов и приводят к сильным штормам, из-за которых в регионе гибнет множество рыбаков ежегодно.

В работах, посвященных влиянию озер на региональный климат, делаются общие выводы о том, что наличие озер обуславливает увеличение осадков на близлежащей территории, в основном зимой и осенью. В это время озерная вода чаще всего намного теплее расположенной над ней воздушной массы. В этих условиях озера генерируют конвекцию и являются источником влаги для увеличения облачности и осадков. В течение лета озера играют роль охлаждающего и стабилизирующего фактора для нижней атмосферы, и таким образом, уменьшают конвективные осадки. В районе озёр минимальная температура для всех сезонов выше. Максимальная температура выше зимой, ниже весной и летом, осенью эффекта не наблюдается. Следовательно, озёра способствуют сглаживанию временного хода температуры. На облачность в бореальной зоне наличие озер сильнее всего влияет зимой (увеличение), когда озера являются источником влаги и тепла для холодной сухой континентальной полярной воздушной массы. Максимальное влияние на облачность оказывают большие озера. Летом наличие озер уменьшает количество облачности из-за повышения устойчивости атмосферы. Влияние озёр на ветер носит исключительно региональный характер. Обычно скорость ветра над озерами выше, чем над сушей, что объясняется меньшим трением над водной поверхностью.

Во **второй главе** описана база данных о глубинах озер для целей численного моделирования и её улучшение с помощью добавления косвенных оценок типичных глубин озер, полученных на основе выделения геологически однородных относительно происхождения озер регионов. Косвенные оценки глубин озер в улучшенной версии озерной базы верифицированы по независимым данным.

База данных о глубинах озер GLDBv1 была разработана для параметризации озер в гидродинамическом атмосферном моделировании. Информация о глубинах озер представлена на пространственной сетке с разрешением  $30''$  (примерно  $1 \text{ км}^2$  у экватора). При создании GLDBv1



использовались следующие источники информации: (i) данные о средних глубинах озер, собранные из различных региональных баз, хранятся в текстовой форме в виде списка (здесь и далее – Список озер); (ii) глобальная цифровая карта экосистем ECOCLIMAP2; и (iii) данные о батиметрии для 36 больших озер, полученные из глобальной цифровой карты батиметрии мирового океана ETOPO1, а также путем оцифровки навигационных и топографических карт. Список содержит около 13000 пресных и солоноватых озер, а также водохранилищ. Существует дополнительный Список, включающий 220 соленых озер и бессточных бассейнов. Глобальная растровая карта экосистем ECOCLIMAP2 имеет разрешение 30” и используется для картирования озер. Данные о средних глубинах из Списка озер были спроецированы на карту ECOCLIMAP2 (картированы) с помощью автоматического метода, основанного на вероятностном подходе (предполагающем, что все источники данных имеют некоторую ошибку). В первой версии базы картировались только данные о пресных и солоноватых озерах. При картировании, когда озеро есть на карте, но данных о его глубине в Списке озер нет, использовалась «фоновая» глубина, равная 10 м. Кроме того, GLDBv1 предоставляет дополнительную карту, в которой закодированы сведения о том, как была получена информация в каждом пикселе карты глубин.

По последним данным число озер в мире равно 117 миллионам, следовательно, количество озер, содержащееся в Списке (около 13000), является очень малой частью от их общего числа (хотя самые большие и важные озера в Список данных базы включены). В процессе работы над диссертацией GLDBv1 была дополнена косвенными оценками средней глубины озер на основе информации об их геологическом происхождении сначала только для бореальной зоны (и выпущена ее следующая – промежуточная версия GLDBv2), а потом и всего мира.

Для нахождения территорий с гомогенным происхождением озер использовались некоторые из геологических карт мира, а также тектоническая карта мира. При выделении областей, однородных с точки зрения факторов, влияющих на происхождение озер, применялся «восходящий» принцип – сначала использовалась информация о самых глубоких слоях земной коры (литосферные плиты и платформы), затем рассматривались менее глубокие слои (четвертичные отложения) и последней – информация о поверхности (горные породы и мерзлота). Вначале были выделены геологически однородные регионы, а затем в выделенных регионах были оценены типичные глубины озер. Оцифровка контуров была произведена с помощью инструментов географических информационных систем. Форма оцифрованной информации – векторная, каждый контур – многоугольник (полигон) представлен в виде координат его вершин.

Далее необходимо было скомпоновать все имеющиеся материалы. Для этого был разработан автоматический метод. Данные о контурах геологических областей и о расположении озер компоновались вместе, то есть объединялись векторная и растровая (или текстовая, для Списка озер) информация. Учитывалось, что в реальности (географически) пересечений некоторых контуров не существует, хотя математически они возможны. Кроме того, для некоторых результирующих контуров отсутствуют данные об озерах из GLDBv1. Такие случаи также сразу исключались из рассмотрения, так как в этих регионах, на основе имеющихся данных, невозможно сделать никакого предположения о типичной глубине озер. Для реализации метода нами был разработан программный комплекс на языке программирования Fortran90.

Входными данными для работы программного комплекса послужили как уже имеющаяся в GLDBv1 информация, так и оцифрованные контуры – границы районов. Для того, чтобы в дальнейшем удобно было проводить статистический анализ, контуры обрабатывались дважды: с данными о расположении озер, полученными из Списка озер и с данными пиксельной карты. Информация обрабатывалась следующим образом. Координаты – широта и долгота – каждого озера из Списка озер (при условии присутствия информации о средней его глубине) использовались для определения: литосферной плиты и геологической платформы, на которых оно находится; наличия мерзлоты, определения типа четвертичных отложений и горных пород, которые присутствуют в месте, где расположено озеро. По результатам этой обработки получались географические районы – пересечения контуров, то есть геологически однородные регионы. Они считались регионами с однородным геологическим происхождением озер. В результате было определено, что можно выделить 374 региона с однородным геологическим происхождением озер: 141 регион в бореальной зоне, и 233 региона в оставшейся части земного шара. Далее контуры этих регионов в векторной форме были получены наложением с помощью программных средств геоинформационных систем. Эти контуры использовались в дальнейшем для визуального анализа.

Для определения характерной (типичной) глубины озер для каждого из выделенных регионов набиралась и анализировалась статистика из GLDBv1. Перед статистическим анализом Список озер был дополнен новыми данными о приблизительно 500 озерах бореальной зоны и 1000 озер оставшейся части земного шара, а также 50 солеными озерами и бессточными бассейнами. При анализе статистики на основе Списка озер для бореальной зоны учитывались только пресные, а для остальной части земного шара также и соленые озера.

Для каждого региона были построены гистограммы распределения озер по глубинам на основе Списка озер и на основе озерных пикселей

электронной карты глубин. Распределение озерных пикселей косвенно учитывает площади озер. Строилась эмпирическая функция распределения средних глубин по грациям. Также для каждого региона формировались списки озер, чтобы иметь возможность исключить из анализа озера, имеющие нетипичное для данного региона происхождение. Основное внимание при анализе гистограмм уделялось максимальным значениям, которые считались наиболее вероятной глубиной озер в выделенных регионах. Если было достаточно данных для статистики, и максимумы гистограмм на основе Списка озер и для озерных пикселей совпадали, то принималось экспертное решение относительно типичной глубины озер в регионе – она равна наиболее вероятной глубине. В случае, если максимумы гистограмм были далеки друг от друга, то использовался фильтр: анализировались дополнительные гистограммы, построенные только по малым озерам, с площадью водной поверхности меньше, чем  $200 \text{ км}^2$ . Такое пороговое значение было выбрано исходя из того, что глубина большинства озер крупнее  $200 \text{ км}^2$  измерена, а вот меньших по площади – нет, а ведь именно для них предполагается оценка типичных глубин. Таким образом, для каждого региона были построены четыре гистограммы: две на основе Списка озер и две для озерных пикселей – со статистикой, набранной по всем имеющимся в GLDBv1 озерам и по озерам не крупнее, чем  $200 \text{ км}^2$ . После этого принималось экспертное решение о типичной глубине озер региона. Всего было построено и проанализировано для бореальной зоны 564 гистограммы распределения озер по глубинам, а для остальной части земного шара еще 932 гистограммы.

Получившиеся статистические оценки послужили основой для критической экспертной обработки, индивидуальной для каждого получившегося региона. В подавляющем большинстве случаев статистической оценки было достаточно для принятия уверенного решения относительно типичной глубины. Когда в каком-либо регионе не набиралось достаточно данных для принятия экспертного решения о типичной глубине, использовались либо «географический» метод, либо метод аналогов.

Метод аналогов заключается в том, что при определенных геологических знаниях можно некоторые достаточные для принятия уверенного решения статистики региона распространять на другой или другие регионы, где статистики оказалось недостаточно. «Географический» метод, который основан на географической зональности, когда средняя глубина озера зависит от его площади и типа природной зоны, применялся только в бореальной зоне при невозможности использовать другие способы. Также использовался «улучшенный геоморфологический» метод, который основывается на зависимости объема озер (а значит, и глубины) от площади их поверхности для разных территорий, в зависимости от геологического происхождения озер. Метод разработан только для территории Северо-Запада

России, и был использован только для этой территории. Кроме того, в отдельные списки были выделены кратерные озёра и водохранилища, так как чаще всего они являлись исключениями для территории с однородным геологическим происхождением озёр. Для водохранилищ «фоновая» глубина задавалась равной 10 м, а для кратерных озёр – 50 м.

Была создана улучшенная версия озерной базы GLDBv3. Была построена новая электронная (пиксельная) карта мира, включающая данные о глубинах пресных, солоноватых и солёных озёр, а также косвенные оценки глубин. Были созданы также новые вспомогательные пиксельные карты статусов – закодированной информации о происхождении (а соответственно, и надёжности) данных о глубине.

Приведем пример для острова Тасмания, Австралия. На рисунке 1 представлены фрагменты соответствующих пиксельных карт. В первой версии карты были известны глубины лишь нескольких озёр, поэтому практически все озерные пиксели на данной территории имели «фоновую» глубину 10 м. В новой версии были добавлены новые данные и результаты экспертной оценки (вся центральная часть острова). Поэтому глубины в новой версии базы оказались значительно больше.

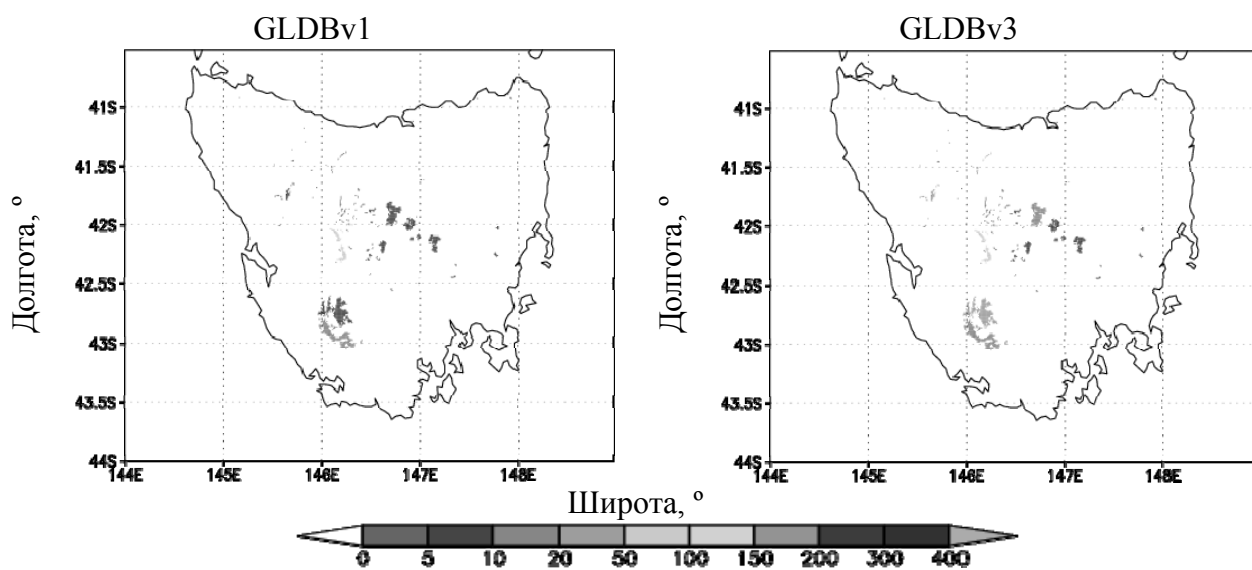


Рисунок 1 – Глубина озера, м

Косвенные оценки глубин озёр в GLDBv3 были верифицированы по независимым данным. Для этого использовались новые измерения глубин 353 озёр Финляндии. Рассматривались ошибки – разницы между глубинами озёр ( $H_B$ ) из GLDBv1 и GLDBv3 полученными путем косвенных оценок, и реальной глубиной ( $H_R$ ). Для ошибок были посчитаны основные статистические параметры ошибок. На основе их анализа можно сделать выводы о значительном уменьшении средней абсолютной ошибки в GLDBv3 по сравнению с GLDBv1, а именно с 5.4 м до 2.6 м (различия статистически значимы). Средняя квадратичная ошибка уменьшилась в GLDBv3 почти в два

раза, по сравнению с GLDBv1: с 6.1 м до 4.0 м (различия статистически значимы). Так как распределение ошибок оказалось негауссовым, для оценки статистической значимости различий использовался непараметрический критерий Крускала-Уоллиса.

Для изучения чувствительности гидродинамической модели атмосферы к заданию параметра «глубина озер» была использована ситуация, описанная в (Eerola, K. *Impact of partly ice-free Lake Ladoga on temperature and cloudiness in an anticyclonic winter situation – a case study using a limited area model* / K. Eerola, L. Rontu, E. Kourzeneva, H. Kheyrollah Pour and C. Duguay // *Tellus A, Vol 66. – 2014. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v66.23929>*). Было показано, что правильное задание глубины Ладожского озера в модели значительно уменьшает ошибки прогноза облачности и температуры зимой в антициклонической ситуации. В качестве гидродинамической модели использовалась гидростатическая модель HIRLAM (High Resolution Limited Area Model). Дополнительно к экспериментам, описанным в этой статье, был проведён эксперимент с «фоновыми» значениями глубины озёр, равными 10 м, и проанализированы его результаты. Мы используем как результаты и выводы, полученные в статье, так и результаты нового эксперимента.

Озера, расположенные в северных и средних широтах, регулярно замерзают зимой. Тем не менее, часто они остаются свободными ото льда до поздней осени и ранней зимы. В январе 2012 года в Финляндии наблюдалось исключительное погодное явление. В течение нескольких дней на небольшой территории колебания температуры составили 17 °С. Например, в городе Иматра наблюдалась температура -11 °С, а городе Париккала, который расположен на 60 км севернее, – -28 °С. Причиной этого было низкое облако, образовавшееся над почти полностью свободным ото льда Ладожским озером и перемещенное ветром в район восточной Финляндии. Над территорией Финляндии стоял антициклон с холодной безоблачной погодой, слабым ветром и сильной приземной инверсией. Над свободной ото льда водной поверхностью наблюдалась большая разница температур между воздухом и водой. В холодной зимней антициклонической ситуации приземная температура воздуха определяется облачным покровом. В анализируемой ситуации над частично свободным ото льда Ладожским озером возникло низкое облако, которое в результате адвекции распространилось далеко в восточную Финляндию. Под облачностью температура воздуха повышалась, а при ясном небе оставалась низкой.

Мы рассматриваем результаты трёх экспериментов с моделью HIRLAM: OLD и TRUE из (Eerola et al., 2014) и дополнительного эксперимента D10. В эксперименте OLD используются климатические значения температуры поверхности воды и климатический ледовый покров. В эксперименте TRUE включена параметризация озёр с помощью модели FLake, глубины озер

заданы из GLDBv3. В эксперименте D10 также включена параметризация озёр с помощью модели FLake, однако все глубины равны «фоновому» значению 10 м. Эксперименты проводились для всей зимы 2011-2012 годов для территории Скандинавии и Карелии с горизонтальным разрешением приблизительно 7.5 км и 65 уровнями по вертикали. Смоделированные крупномасштабные поля – положение и мощность антициклона – были одинаковы во всех экспериментах. Однако в прогнозе погоды для восточной Финляндии наблюдались различия – из-за различных значений внешних параметров и, как следствие, описания состояния поверхности озера Ладога. В экспериментах OLD и D10 озеро Ладога замерзло полностью, в TRUE – северная часть озера к концу января 2012 была еще свободна ото льда, что соответствовало реальности. На рисунке 3 представлен 6-часовой прогноз облачности нижнего яруса и приземной температуры в трёх экспериментах. В экспериментах OLD и D10 количество низкой облачности близ озера Ладога очень невелико, в TRUE – над северной частью озера были спрогнозированы облака. Облако распространилось в северном направлении в соответствии с преобладающим слабым юго-восточным ветром. Сравнивая эти результаты со спутниковым снимком, который представлен на рисунке 4, видно, что расположение облака очень реалистично, с небольшим смещением на запад.

Результаты эксперимента D10 практически повторяют результаты эксперимента OLD. Это произошло потому, что озеро Ладога в эксперименте D10 к моменту начала ситуации уже замёрзло. Вследствие этого, в эксперименте D10 были повторены все те же ошибки, что и в эксперименте OLD: отсутствие низкой облачности и заниженные значения температуры. Эксперимент с правильным описанием глубины Ладожского озера, и как следствие, с реалистичным воспроизведением ледового покрытия смог предсказать формирование и перемещение облаков, что, в свою очередь, улучшило прогноз погоды. Имея такие карты погоды синоптик смог бы предсказать значительные изменения температуры над восточной Финляндией.

**В третьей главе** рассматривается анализ ошибок моделирования озерной модели FLake в зависимости от термического режима озера. Первоначально мы пытались использовать результаты моделирования для косвенной верификации новых «фоновых» глубин в новой версии озёрной базы. Но модельные ошибки оказались существенно различными в зависимости от сезона и термодинамического режима озера, что означает, что верификацию нельзя проводить для года в целом, ее результаты будут различными для различных сезонов.

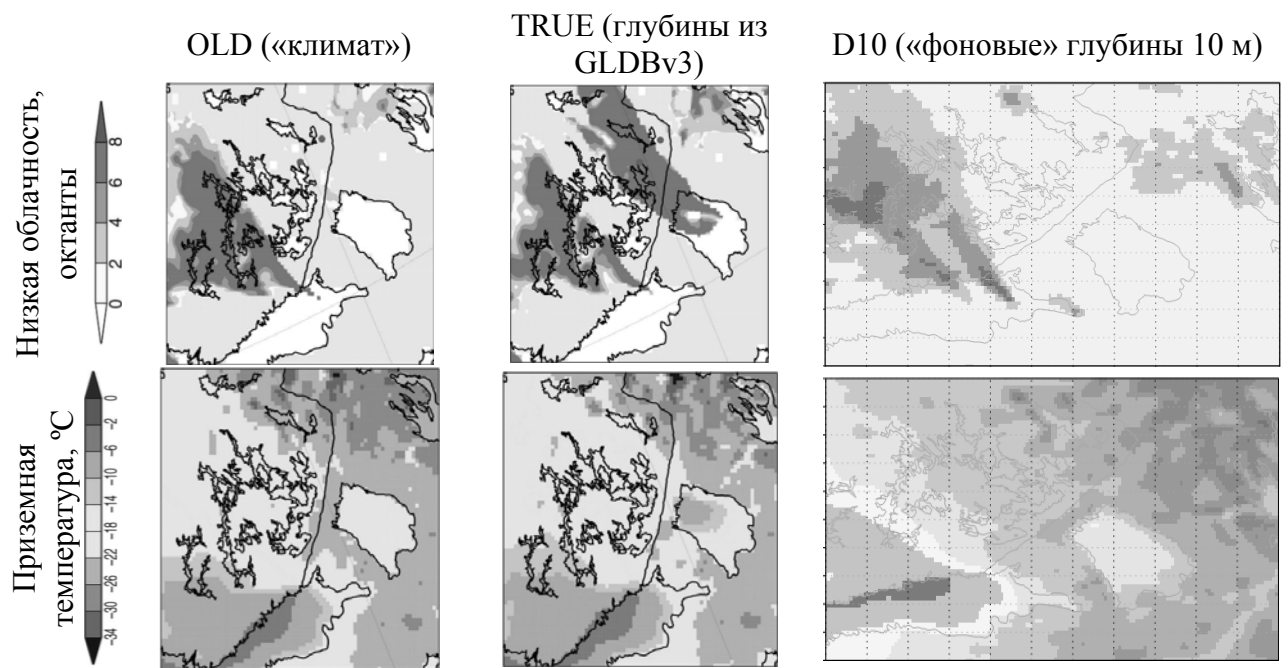


Рисунок 2 – Прогноз на +6 часов низкой облачности, октанты, и приземной температуры, °C. Время анализа (начальный момент прогноза) 28 января 00 UTC (из *Eerola et al., 2014*)

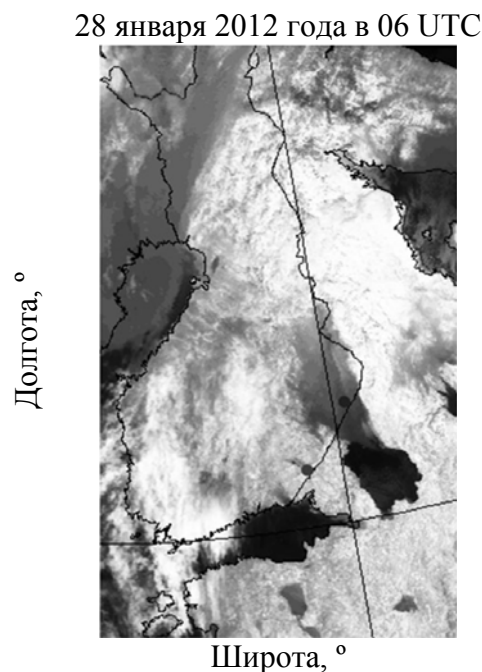


Рисунок 3 – Инфракрасное изображение NOAA AVHRR над территорией Финляндии и Карелии (из *Eerola et al., 2014*)

При проведении косвенной верификации мы сравнивали результаты моделирования озерной модели FLake с измерениями температуры поверхности, при использовании моделью глубины озера из различных баз данных: GLDBv1 и GLDBv3 (ее не окончательная версия). Верификация проводилась для озера Кюувеси (Kuovesi), находящегося на юге Финляндии. Информация о глубине этого озера поступила после того, как были

сгенерированы обе версии базы (в окончательную версию рассматриваемое озеро было внесено). Кюувеси (61.970 ° с.ш., 27.135 ° в.д.) является достаточно большим озером. Несмотря на значительный размер (129,95 км<sup>2</sup>), это очень мелкое озеро, средняя глубина которого равна 4.4 метра, а максимальная достигает 35.0 метров. Озеро Кюувеси является одним из 27 озер, для которых Финский институт окружающей среды (SYKE) проводит ежедневные оперативные наблюдения температуры поверхности воды. Смоделировав температуру поверхности озера, мы провели сравнительный анализ данных наблюдений и модельных данных, рассчитанных для трех средних глубин: 1) истинной, равной 4.4 метра; 2) основанной на косвенной оценке по геологическому признаку из GLDBv3 и равной 7.0 метрам; 3) «фоновой» из GLDBv1, равной 10.0 метрам.

В результате визуального анализа временного хода озерных прогностических переменных было выделено 6 озерных сезонов:

1) «зима» – между моментами установления и разрушения зимнего профиля;

2) «весеннее перемешивание» – с момента разрушения зимнего профиля до начала стабильного уменьшения глубины перемешанного слоя  $H_{ml}$ . Озеро в основном перемешано до дна, в профиле температуры – только перемешанный слой;

3) «весеннее уменьшение  $H_{ml}$ » – начинается с конца «весеннего перемешивания» и заканчивается моментом, когда  $H_{ml}$  становится стабильно меньше половины глубины озера;

4) «лето» – начинается с конца «весеннего уменьшения  $H_{ml}$ » и заканчивается, когда  $H_{ml}$  становится стабильно больше половины глубины озера. Перемешанный слой очень мал и ход анализируемых переменных почти полностью определяется форсингом;

5) «осеннее углубление  $H_{ml}$ » – с конца «лета» по начало «осеннего перемешивания», когда  $H_{ml}$  начинает достигать глубины озера;

6) «осеннее перемешивание» – с конца «осеннего углубления  $H_{ml}$ » по возникновение на озере льда.

Сезон «весеннего перемешивания» начинается во всех экспериментах одновременно, а заканчивается немного (до двух дней) позднее в экспериментах с большей глубиной. Во всех экспериментах температура перемешанного слоя  $T_{ml}$  растет. Самый быстрый рост наблюдается в экспериментах с глубиной 4.4 м, самый медленный – с глубиной 10.0 м. Измеренная температура поверхности также растет, но медленнее, чем модельная. Кроме того, свой рост в этом сезоне она начинает не с 0 °С, как  $T_{ml}$  в модельных экспериментах, а с 7 °С. Причина состоит в том, что в реальности озеро полностью освободилось ото льда на 12 дней раньше, чем в модели, и к моменту начала модельного «весеннего перемешивания» реальная



температура уже существенно возросла. Таким образом, во всех экспериментах наблюдается сильное занижение моделью  $T_{ml}$  по сравнению с измеренной температурой поверхности. Для GLDBv3 (7.0 м глубины) по сравнению с GLDBv1 (10.0 м глубины) средняя абсолютная ошибка  $\mu$  меньше (6.7 °C против 7.3 °C); среднеквадратичная ошибка  $e$  также меньше (6.7 °C против 7.4 °C). Для реальной глубины 4.4 м  $\mu$  составляет 5.2 °C, а  $e$  – 5.5 °C.

Сезон «весеннего уменьшения  $H_{ml}$ ». Рост температур продолжается, но медленнее, в конце сезона величины становятся постоянными. Самый быстрый рост наблюдается в экспериментах с глубиной 4.4 м, самый медленный – с глубиной 10.0 м. Для GLDBv3 (7.0 м глубины) по сравнению с GLDBv1 (10.0 м глубины)  $\mu$  меньше почти в два раза (3.4 °C против 5.9 °C). Для реальной глубины 4.4 м  $\mu$  составляет 0.0 °C, а  $e$  – 1.4 °C.

В летний сезон  $H_{ml}$  в экспериментах со всеми глубинами приблизительно одинакова. Значения  $T_{ml}$  сильно завышаются моделью по отношению к данным наблюдений. Завышение тем меньше, чем больше глубина. В результате завышения  $T_{ml}$  по отношению к измеренной температуре поверхности, минимальная ошибка моделирования имеет место при значительном завышении истинной средней глубины озера. Для GLDBv3 (7.0 м глубины) по сравнению с GLDBv1 (10.0 м глубины)  $\mu$  больше (-1.8 °C против -2.0 °C);  $e$  одинакова и равна 2.6 °C. Для реальной глубины 4.4 м  $\mu$  составляет -2.1 °C, а  $e$  – 2.9 °C.

Сезон «осеннего углубления  $H_{ml}$ » начинается во всех экспериментах одновременно, а заканчивается тем раньше, чем меньше глубина озера в эксперименте. Различия в датах окончания значительные, до 10 дней. Значения  $T_{ml}$  быстро уменьшаются. Самое быстрое падение наблюдается в экспериментах с глубиной 4.4 м, самое плавное – с глубиной 10.0 м. Для GLDBv3 (7.0 м глубины) по сравнению с GLDBv1 (10.0 м глубины)  $\mu$  немного меньше (-0.8 °C против -0.7 °C);  $e$  также слегка меньше (1.0 °C против 1.1 °C). Для реальной глубины 4.4 м  $\mu$  составляет -0.1 °C, а  $e$  – 0.7 °C.

Во время сезона «осеннего перемешивания» уменьшение  $T_{ml}$  продолжается. Самые высокие значения наблюдаются в экспериментах с глубиной 10.0 м, а самые низкие – с глубиной 4.4 м. Для GLDBv3 (7.0 м глубины) по сравнению с GLDBv1 (10.0 м глубины)  $\mu$  немного меньше (-0.9 °C против -0.7 °C);  $e$  также слегка меньше (0.9 °C против 1.1 °C). Для реальной глубины 4.4 м  $\mu$  составляет 0.1 °C, а  $e$  – 0.5 °C.

В результате анализа значений средних абсолютных ошибок ( $\mu$ ) и среднеквадратичных ошибок ( $e$ ) можно сделать вывод, что для всех сезонов, кроме «лета», результаты по GLDBv3 лучше, чем по GLDBv1. Однако модельные ошибки довольно велики даже в экспериментах с реальной глубиной 4.4 м. Продолжительность озерных сезонов невелика, и осреднение при расчете ошибок проводилось по малым выборкам. Для оценки

статистической значимости были использованы непараметрические критерии Крускала-Уоллиса и Данна. По критерию Крускала-Уоллиса для сезонов «весна» и «осень» обнаружилось межгрупповое различие. Однако по критерию Данна различия оказались статистически значимы только для групп с глубинами 4.4 и 10.0 м для «весны» и 4.4 и 7.0 м и 4.4 и 10.0 м для «осени», но не для 7.0 и 10.0 м. Таким образом, с точки зрения результатов моделирования, значение глубины из GLDBv3 пока еще далеко от реальной средней глубины озера Кюувеси.

В **четвертой главе** рассматриваются оценки статистических свойств температуры поверхности озерной воды, необходимые для объективного анализа и использования в моделях численного прогноза погоды.

В гидродинамических моделях атмосферы температура поверхности озерной воды ( $T_s$ ) является определяющей переменной, так как она напрямую связана с потоками тепла. Температура поверхности озерной воды является прогностической переменной в моделях, но она также может быть известна из наблюдений. Для того, чтобы использовать наблюдения в численном прогнозе, необходимо проинтерполировать их на сетку атмосферной модели, то есть нужен объективный анализ. Для объективного анализа необходимы знания о статистической структуре рассматриваемых полей – полей температуры поверхности озерной воды.

Разработка методов объективного анализа в атмосферном моделировании началась в середине прошлого века. Оптимальная интерполяция применялась в системах оперативного прогноза погоды для анализа свободной атмосферы вплоть до ранних 2000-х. В настоящее время она применяется для анализа таких приземных переменных как приземная температура и влажность, температура поверхности морской воды, высота снежного покрова. Оптимальная интерполяция основана на идее минимизации средней ошибки анализа в статистическом смысле. Метод оптимальной интерполяции основывается на знании статистических характеристик полей фоновых переменных и оценках ошибок наблюдения.

Оптимальная интерполяция – один из видов объективного анализа, в котором для получения значения в узле сетки используются весовые коэффициенты и ошибки наблюдения. Весовые коэффициенты зависят как от расстояния между пунктом наблюдения и узлом сетки, так и от расстояния между разными пунктами наблюдения; учитываются ошибки всех типов наблюдений. Достоинство оптимальной интерполяции заключается в том, что информация о пространственной статистической структуре полей включена в процедуру анализа через использование автокорреляционных функций. Если в качестве фонового поля служит климатологическая информация, то для расчёта весовых коэффициентов должна использоваться автокорреляционная функция самих метеорологических полей. Если же в качестве фонового поля

служит предыдущий прогноз, то строго говоря, необходимо использовать автокорреляционную функцию ошибок прогноза. Однако и в этом случае зачастую используют автокорреляционную функцию для самих полей – на том этапе, когда архивы прогнозов для расчета ошибок ещё не набраны. Весовые коэффициенты определяются из решения системы линейных уравнений, куда входят значения автокорреляционной функции и мера случайной ошибки наблюдений. В настоящее время в большинстве прогностических систем автокорреляционная функция для температуры поверхности воды аппроксимирована экспоненциальной зависимостью от расстояния с некоторым радиусом влияния (обычно 80 км), одинаковым как для морской, так и для озёрной воды. Корректность данного допущения по отношению к температуре поверхности воды озер никогда не исследовалась. Глубина озёр является одним из существенных факторов, определяющим их тепловой режим. Поэтому изучение автокорреляционной функции для температуры поверхности озёрной воды и получение зависимости не только от расстояния по горизонтали, но и от разницы в глубинах озер, является чрезвычайно важным и актуальным.

Автокорреляционные и структурные функции рассчитывались нами по данным наблюдений Финского института окружающей среды SYKE – сокращенное название на финском языке) за температурой поверхности озёрной воды 27 озер Финляндии. Использовались данные за пять лет – с 2010 по 2014 год. Данные отбирались только за экстремальный период – лето (92 дня) – с целью уменьшения ошибок расчётов за счёт неоднородности выборки из-за сезонного хода. Общее количество наблюдений  $\approx 12400$  (27 озер  $\times$  5 лет  $\times$  92 дня в году  $\times$  примерно 1 измерение в сутки). Предварительно для каждого из  $n = 27$  озер отдельно рассчитывались сезонные климатические нормы – средние значения  $T_s$  по всем измерениям. Порядок расчётов следует алгоритму, описанному в (Гандин, Л.С. *Объективный анализ метеорологических полей* / Л.С. Гандин // Л.: Метеорологическое издательство. – 1963. – С. 1-288.). Вычисления производились по данным каждого срока наблюдений последовательно.

Структурная и автокорреляционная функции были рассчитаны вначале в зависимости только от расстояния между озерами. Структурная функция возрастает в зависимости от расстояния, а автокорреляционная – убывает. Также были рассчитаны структурная и автокорреляционная функции, зависящие как от расстояния между озерами, так и от разниц их глубин. Для каждой градации по разнице глубин были найдены структурная и автокорреляционная функции, зависящие от расстояния.

Далее с помощью графика структурной функции была найдена ошибка наблюдения, которая включает в себя как инструментальную ошибку, так и ошибку репрезентативности. Ошибка наблюдения оказалась равной 0.8 К.

Следующий необходимый шаг – нахождение нормированной автокорреляционной функции температуры поверхности озерной воды. Нормировать автокорреляционную функцию необходимо на разность «межозерной» дисперсии и ошибки наблюдения, являющейся постоянной. «Межозерная» дисперсия  $\sigma_{gr}^2$  зависит от того, какие именно озера и как часто попадают в расчётах для каждой градации. Значения  $\sigma_{gr}^2$  различны для каждой градации как по расстоянию между озерами, так и по разнице глубин.

Полученные на основе данных измерений нормированные автокорреляционные функции были аппроксимированы нами экспоненциальной зависимостью. Для аппроксимации использовался нелинейный алгоритм наименьших квадратов Марквардта-Левенберга, предполагающий итерационный процесс. Был получен двухмерный вариант нормированной автокорреляционной функции: аппроксимация её экспонентой, зависящей как от расстояния, так и от разницы глубин, формула 1. Значение радиуса влияния по расстоянию оказалось равным 1077.0 км, а по разнице глубин – 20.8 м:

$$\mu(\rho, \delta) = e^{-\left(\frac{\rho^2}{2L_\rho^2} + \frac{\delta^2}{2L_\delta^2}\right)}, \quad (1)$$

где  $L_\rho = 1077.0$  км

$L_\rho$  – радиус влияния по расстоянию;

$L_\delta = 20.8$  м

$L_\delta$  – радиус влияния по разнице глубин.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе исследования:

- выделены однородные с точки зрения геологического происхождения озер регионы, найдены типичные глубины озер для этих регионов, сгенерирована новая, улучшенная глобальная база данных о глубинах озер всего земного шара;
- результаты оценки ошибок моделирования озерной модели FLake, оказались зависящими от сезона года и термического режима озера;
- по инструментальным измерениям получены новые структурные и автокорреляционные функции для полей температуры поверхности озерной воды, зависящие как от расстояния между озерами, так и от расстояния и разницы глубин между озерами территории.

#### **Основные публикации по теме диссертации:**

По теме диссертации опубликовано 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, из них 1 – в высокорейтинговом зарубежном издании.

Опубликованные работы полностью отражают содержание и защищаемые положения диссертации. Среди опубликованных:

1. Choulga M., Kourzeneva E., Zakharova E., and Doganovsky A., 2014. Estimation of the mean depth of boreal lakes for use in numerical weather prediction and climate modeling. *Tellus A*, 66, 21295;

2. Шульга М., Курзенева Е.В. Верификация косвенных оценок в базе данных по глубинам озер для целей атмосферного моделирования. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 37. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2014. – 120-143 с.