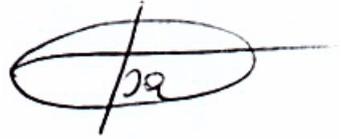


На правах рукописи



**Богомолов Василий Юрьевич**

**Параметризация внутренних водоемов суши в модели Земной системы**

Специальность 05.13.18 —

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор, Гордов Евгений Петрович

**Официальные оппоненты:**

**Елисеев Алексей Викторович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

**Платов Геннадий Алексеевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

Защита состоится 16 октября 2018 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д003.061.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, конференцзал ИВМиМГ СО РАН, тел. +7 (383) 330-71-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук: <http://icmmg.nsc.ru>.

Автореферат разослан 22 июня 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н.



Сорокин Сергей Борисович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

В настоящее время, в математических моделях Земной системы большая часть гидрологических процессов, происходящих в деятельном слое суши параметризуется, либо рассчитывается с сильными упрощениями. Например, в климатической модели Института вычислительной математики (ИВМ) РАН водоемы рассматриваются как почва с пленкой воды на поверхности. Активное развитие вычислительных технологий и рост производительности суперкомпьютеров привели к тому, что в настоящее время характерное разрешение моделей Земной системы составляет  $0.25^{\circ}$ - $0.5^{\circ}$ . При таком разрешении многие ранее подсеточные объекты становятся разрешаемыми на сетке структурами и должны описываться явно.

Одними из таких объектов являются внутренние водоемы, играющие важную роль в формировании локальных погодных условий, и определяющие специфические особенности климата над прилегающей территорией. Для учета влияния озер на погоду и климат необходимо включение в модель Земной системы модели водоема, способной воспроизводить характеристики поверхности озер и необходимые для описания биогеохимических циклов термодинамические процессы в толще воды. Такая модель должна быть физически обоснованной, применимой для разных климатических зон, вычислительно эффективной и допускающей использование больших шагов по времени ( $\sim 1$  ч).

Целью работы является параметризация водоемов суши в модели Земной системы ИВМ РАН.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Создать параметризацию на основе выбранной одномерной термодинамической модели водоема, обеспечивающую в рамках климатической модели оптимальное сочетание вычислительной простоты и «физической адекватности», а также возможности запуска в многопроцессорном режиме.
2. Исследовать, на основе численных экспериментов в идеализированных постановках и для реальных озер, чувствительность численного решения модели водоема к пространственному и временному разрешению и сходимость конечно-разностной схемы модели при использовании различных турбулентных замыканий.

3. Создать пакет программ для построения цифровых карт распределения площади и глубины водоемов на Земном шаре, с необходимым для использования в климатической модели пространственным разрешением сетки. Пакет программ должен также обеспечить коррекцию маски типов суши, в которой водоемы ранее не были представлены.
4. Интегрировать созданную параметризацию и сопряженные с ней входные данные в климатическую модель ИВМ РАН.
5. Провести валидацию на имеющихся данных измерений созданной параметризации, как части климатической модели, и оценить ее влияние на потоки тепла и импульса в приземном слое над водоемами.

### **Научная новизна:**

1. Проведено сравнение результатов использования различных турбулентных замыканий в модели озера, как в идеализированных, так и реальных расчетах.
2. Исследована сходимость численного решения для одномерной модели водоема в идеализированных расчетах и расчетах реального водоема при использовании различных турбулентных замыканий.
3. Создан программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме создавать карту распределения площадей и глубин водоемов на сетке климатической модели с дальнейшей коррекцией маски типов суши модели.
4. В климатическую модель ИВМ РАН, интегрирована термодинамическая одномерная модель водоема.

### **Теоретическая и практическая значимость:**

1. Обеспечена возможность исследования вклада водоемов в энергетический и углеродный баланс деятельного слоя и в формирование регионального климата.
2. Показана возможность качественного воспроизведения термического режима водоемов при использовании простой параметризации коэффициента теплопроводности при климатическом моделировании с достаточно большими шагами по времени.
3. Создана вычислительно эффективная модификация одномерной модели водоема для использования в системах прогноза погоды и моделирования климата.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Вычислительно эффективная модификация одномерной модели водоема для использования в системах прогноза погоды и моделирования климата.
2. Оценка точности решения и его сходимости для одномерной модели водоема в идеализированных расчетах и расчетах для реального водоема при использовании различных турбулентных замыканий.
3. Программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме создавать карту распределения площади и глубины водоемов на сетке климатической модели с коррекцией распределения типов суши.
4. Интегрированная новая параметризация внутренних водоемов в климатическую модель ИВМ РАН.
5. Оценки влияния внутренних водоемов суши на характеристики подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха в условиях современного климата на основе численных экспериментов с предложенной версией климатической модели.

### **Апробация результатов:**

Основные результаты работы докладывались на следующих мероприятиях: на Генеральных ассамблеях Европейского союза наук о Земле (Австрия, Вена, 2011, 2013 и 2014), Международных конференциях по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, «ENVIROMIS» (Томск, 2014 и 2016), Международной конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES» (Томск, 2015), Русско-финском семинаре «Взаимодействие суши и атмосферы в неоднородных ландшафтах» (Москва, 2016).

### **Личный вклад:**

Основные результаты работы получены автором лично.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав и списка используемой литературы. Общий объем диссертации – 107 страницы. Диссертация содержит 29 рисунков и 4 таблицы, библиография включает в себя 77 наименований.

### **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе проводятся исследования чувствительности численного решения одномерной модели водоема LAKE<sup>1</sup> к пространственному и временному разрешению и сходимости ее конечно-разностной схемы при использовании турбулентного замыкания  $k - \varepsilon$  и Хендерссон-Селлерс.

В данную модель автором работы была добавлена параметризация коэффициента теплопроводности Хендерссон-Селлерс для устойчивой стратификации. Так как эта параметризация не описывает конвективное перемешивание, автором была предложена схема конвективного приспособления водоема. Алгоритм построен на принципе поиска слоев, в которых выполняется условие  $\rho_{i+1} < \rho_i$  (нумерация слоев вдоль силы тяжести), в дальнейшем производится осреднение температуры в этих слоях.

Оценка условий сходимости численного решения модели проводилась на основе двух численных экспериментов: идеализированный эксперимент Като-Филлипса и эксперимент для озера Куйварви (Финляндия). Коэффициенты Колмогорова в  $k - \varepsilon$  модели задавались как константы для нейтрально стратифицированной среды, и как функции Кануто или Гальперина («функции устойчивости», учитывающие сдвиг скорости и стратификацию).

В эксперименте Като-Филлипса рассматривается идеализированный сценарий ветрового перемешивания на основе одноименного лабораторного эксперимента, показывающего динамику заглупления сдвигового перемешанного слоя в стратифицированную жидкость.

Для каждого из подвидов турбулентного замыкания проводились две группы численных экспериментов (Таблица 1).

*Таблица 1. Пространственное и временное разрешение двух групп численных экспериментов в постановке Като-Филлипса ( $\Delta t$  – шаг по времени,  $M$  – количество горизонтальных слоев одномерной модели)*

Гр. 1. $k$	$\Delta t = 25 \text{ c}$	$H^k = 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640$	$k = 1..7$
Гр. 2. $k$	$M = 40$	$\Delta t^k = 3600; 1800; 900; 450; 225; 100; 50; 25 \text{ c}$	$k = 1..8$

В каждой группе экспериментов сходимость оценивалась по среднеквадратическому отклонению  $\sigma^{k,k+1}$  поля температуры в  $k$ -м эксперименте  $T^k$  относительно поля в  $(k+1)$ -м,  $T^{k+1}$ .

1 V.Stepanenko, I. Mammarella, A. Ojala, H. Miettinen, V. Lykosov, and T. Vesala. LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. Geoscientific Model Development, 9(5):1977–2006, 2016.

Эксперименты Гр.1 показывают, что модель водоема с замыканием  $k - \varepsilon$ , начиная с эксперимента Гр.1.4 ( $M = 40$ ), рассчитывает глубину перемешанного слоя, близкую к аналитическому решению (Рисунок 1).

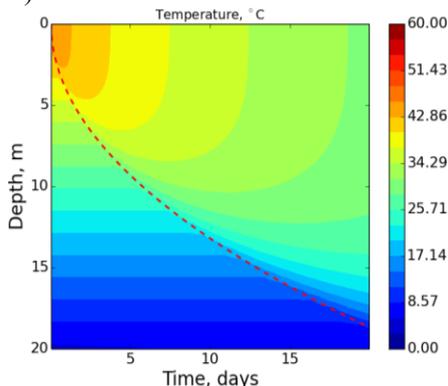


Рисунок 1. Поле температуры в эксперименте Гр1.7,  $\Delta t = 25$ ,  $N^7 = 640$  характерное для замыкания  $k - \varepsilon$

Эксперименты Гр.2 показали, что в случае устойчивой стратификации при постоянном напряжении ветра, модель с замыканием  $k - \varepsilon$  (со всеми вариантами коэффициентов Колмогорова) может давать гладкое решение только с шагом по времени  $\Delta t < 450$  с, а сходимость достигается при  $\Delta t < 100$  с. Эксперимент для озера Куйваярви был произведен со следующими параметрами: глубина озера задавалась 12.5 метров, атмосферный форсинг был заимствован из данных измерений, выполненных университетом Хельсинки на этом озере с 1.05.2013 по 10.11.2013. Модель интегрировалась с замыканиями  $k - \varepsilon$  и Хендерссон-Селлерс. Эксперименты Гр.1 для модели с параметризацией Хендерссон-Селлерс показали, что модель чувствительна только к вертикальному разрешению  $M = 12$  уровней, при уменьшении пространственного шага получаемое решение вело себя аналогично экспериментам для Гр.2.

Эксперименты группы Гр.2 для модели LAKE с  $k - \varepsilon$  замыканием показали, что устойчивость численного решения для реального водоема имела место только при  $\Delta t \leq 450$  с. В экспериментах Гр.2.6 и Гр.2.7 было получено распределение поля температуры, близкое к наблюдаемому для данного водоема.

В ходе экспериментов измерялось также время,  $t$  с, которое вычислительная машина (персональный компьютер) затратила на расчет (Таблица 2).

Таблица 2. Время, затраченное вычислительной машиной для расчета экспериментов одномерной моделью

Параметризация турбулентного теплообмена	$\Delta t / M$	24	48	96
Хендерссон-Селлерс	3600 с	11 с	16 с	18 с
Хендерссон-Селлерс	25 с	192 с	247 с	349с
$k - \varepsilon$	25 с	225 с	313 с	471 с

Результаты экспериментов с параметрами  $\Delta t = 25$  с,  $M = 48$  для модели с  $k - \varepsilon$  замыканием и  $\Delta t = 3600$  с,  $M = 48$  с параметризацией Хендерссон-Селлерс сравнивались с распределением температуры по данным измерений (Рисунок 2).

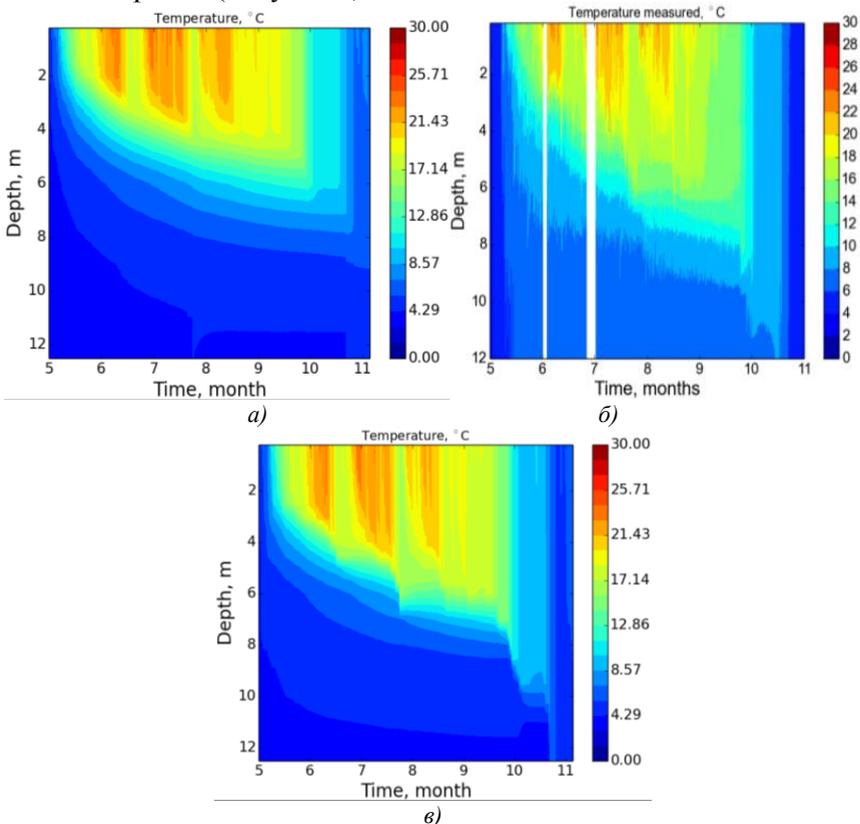


Рисунок 2. Распределение температуры по глубине и времени для озера Куиваярви: а) модель LAKE с параметризацией Хендерссон-Селлерс; б) данные измерений; в) распределение для модели LAKE с замыканием  $k - \varepsilon$

Результаты сравнения с данными измерений (Рисунок 2б) показывают, что модель с параметризацией Хендерссон-Селлерс (Рисунок 2а) удовлетворительно воспроизводит распределение температуры с глубиной, а также динамику перемешанного слоя, незначительно занижая его, кроме октября и ноября, когда глубина перемешанного слоя занижается на 2.5-3 м. В августе не воспроизводится резкое заглубление перемешанного слоя, связанное с сильным напряжением ветра и выхолаживанием поверхности. Эти отклонения не оказывают существенного влияния на воспроизведении температуры поверхности водоема.

Модель с замыканием  $k - \varepsilon$  с различными вариантами задания коэффициентов Колмогорова (Рисунок 2в) довольно качественно воспроизводит измеренное распределение температуры, очень хорошо динамику заглубления перемешанного слоя и скачок температуры в августе. Более качественно, нежели в случае параметризации Хендерссон-Селлерс, воспроизводится глубина перемешанного слоя в осенний период, его занижение незначительно. Однако, модель с замыканием  $k - \varepsilon$  с функциями устойчивости Гальперина, так же, как и для эксперимента Като-Филлипса, занижает глубину перемешанного слоя и сглаживает скачок в августе.

Эти результаты показывают, что в качестве модели турбулентной теплопроводности можно использовать параметризацию Хендерссон-Селлерс и при больших шагах по времени  $\Delta t = 3600$  с с сокращением времени счета в 20 раз по сравнению расчетом для  $\Delta t = 25$  с.

Во **второй главе** описан комплекс программ подготовки внешних данных для параметризации водоема в рамках климатической модели.

Согласно мозаичному подходу агрегирования потоков на поверхности («tile approach»), в моделях Земной системы, в случае присутствия в ячейке озер модель водоема запускается для одного водоема с площадью, равной суммарной площади всех водных объектов. В работе используется глобальный набор данных (<http://www.flake.igb-berlin.de/ep-data.shtml>) по площади и глубинам озер, специально разработанный для прогностических и климатических моделей.

Созданным автором программный комплекс содержит пакет программ, реализованных на языке FORTRAN95, использующий вышеперечисленные входные данные и имеющий следующую архитектуру (Рисунок 3).

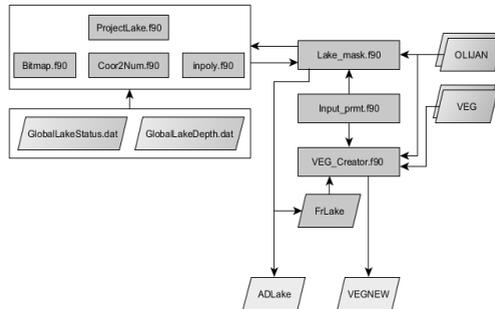


Рисунок 3. Схема взаимодействия компонент программного комплекса подготовки внешних данных для параметризации озер в модели климата

Управляющим модулем в комплексе программ является Input\_prmt.f90. Программа Lake\_mask.f90 создает карту доли площади поверхности, покрытой озерами FrLake, на заданной пользователем широтно-долготной сетке, и карту средней глубины озер ADLake на той же сетке. Программа VEG\_Creator.f90 на основании созданного программой Lake\_mask.f90 текстового файла FrLake и файлов из климатической модели ИВМ РАН VEG и OLIJAN, создает новую карту распределения типов растительности и почвы, содержащую 14 типов, где 14-м типом являются озера. Файлы VEG и OLIJAN заранее подготовлены с разрешением  $2^\circ \times 1.5^\circ$  и  $5^\circ \times 4^\circ$ .

**Третья глава** посвящена включению параметризации водоемов в модель Земной системы ИВМ РАН, а также валидации и анализу результатов численных экспериментов, проведенных с обновленной таким образом моделью ИВМ РАН.

В рамках интеграции программного кода параметризации в программный код климатической модели и адаптации параметризации к климатической модели появляются подзадачи, определяемые требованиями ко всем блокам климатической модели (физическая обоснованность, вычислительная эффективность, вычислительная устойчивость на больших шагах по времени):

- 1) адаптация параметризации под архитектуру построения климатической модели;
- 2) согласование потока данных из климатической модели в параметризацию и наоборот;
- 3) обеспечение возможности запуска параметризации на многопроцессорных системах с реализацией параллельного ввода и вывода;

- 4) реализация агрегирования выходных данных параметризации с данными расчета других типов поверхности ячейки деятельного слоя;
- 5) изменение кода климатической модели для реализации ввода начальных данных необходимых для параметризации и реализация возможности использования различных параметризаций водоема в рамках одной климатической модели.

Верификация параметризации по основным переменным выполнялась по доступным данным измерений, выполненных во второй половину XX века.

В качестве модели озера, была использована разработанная В.М. Степаненко модель LAKE версии 2.0. Помимо внедрения параметризации Хендерссон-Селлерс и конвективного приспособления (Глава 1), в модели была также доработана схема расчета потоков явного, скрытого тепла и импульса, в которой в аэродинамических формулах к горизонтальной скорости была добавлена конвективная компонента скорости  $w^2$ :

$$W = \sqrt{u^2 + v^2 + \beta^2 w_*^2}.$$

Были внесены также следующие изменения в модель ИВМ РАН:

- 1) изменен блок считывания входных данных, добавлена процедура считывания файлов VEGNEW и ADLake;
- 2) изменен блок параллельной записи выходных значений для переменных модели водоема с шагом 6 ч и среднемесячных значений;
- 3) изменены скрипты сборки атмосферного блока с добавлением модулей из модели озера LAKE.

Схема взаимодействия климатической модели ИВМ РАН и модели LAKE для версии 3 представлена на Рисунке 4.

С новой версией модели была проведена верификация температуры поверхности водоемов, рассчитанной параметризацией LAKE в двустороннем взаимодействии с моделью климата ИВМ РАН, с привлечением данных измерений (<https://portal.lternet.edu/nis/mapbrowse?packageid=knblter-ntl.10001.3>).

Сравнение модельной осредненной за 15 лет (1986-2000)

2 Beljaars, A. C. M. (1995), The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection. Q.J.R. Meteorol. Soc., 121: 255–270.

температуры поверхности с данными наблюдений, проведенное для крупных озер, находящихся в разных климатических зонах на разных континентах, показывает, что модель удовлетворительно воспроизводит летнюю осредненную температуру поверхности водоемов. В частности: температура поверхности водоема из климатической модели для озера Гурон  $19,2^{\circ}\text{C}$ , а температура определенная на основе спутниковых данных  $18,52^{\circ}\text{C}$ ; для озера Виктория  $25,25^{\circ}\text{C}$  и  $23,84^{\circ}\text{C}$ , соответственно; для озера Байкал -  $14,83^{\circ}\text{C}$  и  $12,74^{\circ}\text{C}$ , соответственно; а для озера Ладога -  $15,49^{\circ}\text{C}$  и  $14,61^{\circ}\text{C}$ .

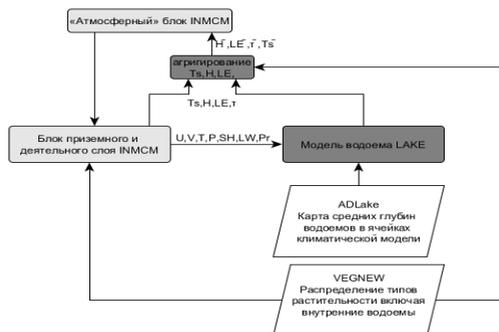


Рисунок 4. Схема изменений в модели климата ИВМ РАН. Белые блоки обозначают новые входные данные для блока деятельного слоя

Были проведены численные эксперименты с измененной моделью ИВМ РАН и с ее исходной версией (горизонтальное разрешение  $2^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ , вертикальное разрешение в атмосфере 21 уровень, период 1979–2000 гг). Анализировалась разница между значениями температуры воды и потоками тепла над водой озера Байкал между двумя экспериментами (Рисунок 5).

Полученные различия в потоках явного и скрытого тепла вызваны тем, что для водоема деятельным слоем является перемешанный слой и изменения температуры поверхности озер являются более медленными, чем изменения температуры почвы.

В аридных регионах появляется отрицательная разница среднегодовой температуры поверхности (Рисунок 6), вызванная различным поглощением коротковолновой радиации почвой и водоемами.

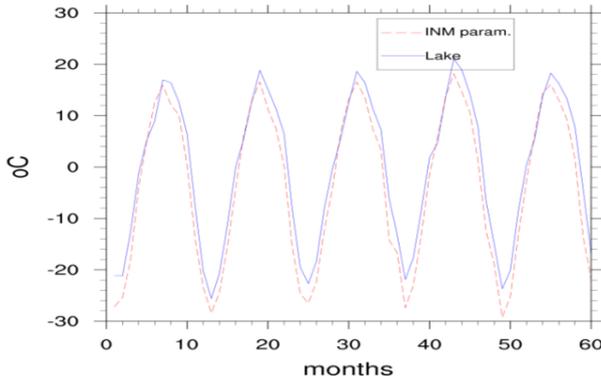


Рисунок 5. Среднемесячные значения температуры поверхности для озера Байкал за 5 лет (красная кривая – предыдущая параметризация озер в модели ИВМ РАН, синяя – LAKE)

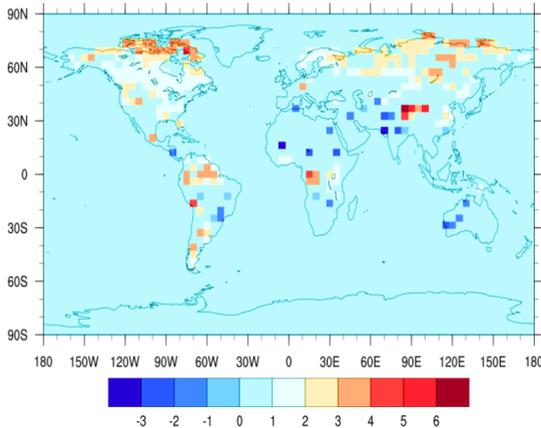


Рисунок 6. Разница среднегодовой температуры поверхности водоемов

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Создана вычислительно эффективная модификация одномерной модели водоема для использования в системах прогноза погоды и моделирования климата.
2. Исследованы условия сходимости конечно-разностной схемы Кранка-Николсон одномерной модели водоема в расчетах идеализированных потоков и реальных водоемов при использовании различных турбулентных замыканий.
3. Создан программный комплекс, создающий карту распределения площади водоемов и глубин на сетке модели с коррекцией распределения типов суши.

4. В климатическую модель ИВМ РАН включена новая параметризация внутренних водоемов.
5. Получены оценки влияния внутренних водоемов суши на характеристики подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха в условиях современного климата на основе численных экспериментов с моделью Земной системы ИВМ РАН, дополненной параметризацией водоемов.

#### **Публикации автора по теме диссертации**

1. Богомолов В.Ю., Степаненко В.М. Сравнение турбулентных замыканий в одномерной модели водоема // Труды МФТИ, – 2017. – Т. 9. – № 4(36). – С. 50 – 64.
2. Bogomolov V., Stepanenko V. and Volodin E. Development of lake parametrization in the INMCM climate model // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2016. V.48. 012005.
3. Богомолов В.Ю., Гордов Е.П., Крупчатников В.Н. Моделирование региональных полей метеорологических величин с высоким пространственным шагом // Горный информационно-аналитический бюллетень, Выпуск Кузбасс-2. – 2009. – С. 50-53.
4. Окладников И.Г., Титов А.Г., Шульгина Т.М., Гордов Е.П., Богомолов Ю.В. Программный комплекс анализа и визуализации данных мониторинга и прогноза климатических изменений // Вычислительные методы и программирование, – 2013. – Т. 14. – С. 123-131.
5. Шульгина Т.М., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Гордов Е.П. Изучение поведения температуры на территории Сибири по данным наблюдений и реанализа // Горный информационно-аналитический бюллетень, Выпуск Кузбасс-2. – 2009. – С. 275-279.
6. Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г., Богомолов В.Ю., Шульгина Т.М., Генина Е.Ю. Геоинформационная веб-система для исследования региональных природно-климатических изменений и первые результаты ее использования // Оптика атмосферы и океана, – 2012. – Т. 25, – № 02. – С. 137-143.
7. Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М. Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // Вестник НГУ, Серия информационные технологии. – 2011. – Т. 9. – Выпуск 1. – С. 56-66.
8. Богомолов В.Ю., Богушевич А.Я., Гордов Е.П., Корольков В.А., Крупчатников В.Н., Тихомиров А.А. Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза

- опасных метеорологических явлений // Оптика атмосферы и океана, – 2011. – Т. 24, – № 01, – С. 52-59.
9. Богомолов В.Ю., Степаненко В.М., Торопов П., Володин Е., Мортиков Е. Развитие блока моделей деятельного слоя суши в климатической модели ИВМ РАН // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2016, Томск, Россия, 11-16 июля 2016. – С. 85– 87.
  10. Богомолов В.Ю., Степаненко В.М., Володин Е.М. Интеграция модели озера в совместную модель общей циркуляции атмосферы и океана//Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2015, Томск, Россия, 20-30 июня 2015. – С. 90 – 93.
  11. Богомолов В.Ю., Степаненко В.М., Окладников И.Г. Определение потока метана с подстилающей поверхности на основе оценки компонент баланса общего количества метана в атмосфере // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2012, Иркутск, 2012.
  12. Stepanenko V., Bogomolov V. Okladnikov I., Yurova A., Gordov E., Lykosov V. The modeling and monitoring framework for assessment of methane and carbon dioxide sinks and sources in the regional climate system of Western Siberia // European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna, Австрия, 2011. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2011/EGU2011-10643.pdf>.
  13. Gordov E., Lykosov V., Krupchatnikov V., Bogomolov V., Martynova Yu., Okladnikov I., Titov A., and Shulgina T. Development of virtual research environment for regional climatic and ecological studies and continuous education support // European Geosciences Union General Assembly 2014, Vienna, Австрия, 2014. Vol. 16, ID. EGU2014-13909.
  14. Bogomolov V., Stepanenko V., and Okladnikov I. Methane emission from Western Siberia derived from the integral methane balance in the troposphere // European Geosciences Union General Assembly 2013, Vienna, Австрия, 2013. ID. EGU2013-10708.