

ОТЗЫВ

официального оппонента

Пененко Алексея Владимировича

на диссертацию Володько Ольги Станиславовны

«Анализ структуры течений в озере Шира в летний период по результатам математического моделирования и натурных измерений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность.

Актуальность исследования определена особенностью положения, которое озеро Шира занимает среди соленых озер. Во-первых, по ряду параметров оно совпадает с другими солеными водоемами (например, Балтийское море) и найденные закономерности течения могут быть распространены на другие объекты. Во-вторых, оно является центром рекреационной зоны Восточной Сибири и изучение, и прогноз динамики течения могут способствовать сохранению лечебных свойств озера.

Цель диссертационной работы.

Целью диссертационной работы О.С. Володько является комплексное исследование гидрофизических характеристик (температуры и солености воды, скорости, направления течения) соленого стратифицированного озера Шира в летний период с применением технологии математического моделирования, вычислительного эксперимента и анализа данных натурных наблюдений.

Работа изложена на 157 страницах и содержит 148 наименований цитируемой литературы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во **введении** Володько О.С. обосновывает актуальность исследований, приводит степень разработанности темы, указывает цель и поставленные задачи, формулирует положения, выносимые на защиту, новые научные результаты, представляет практическую значимость и апробацию результатов.

В **первой главе** представлена математическая модель трехмерного течения неоднородной жидкости в замкнутом водоеме, на основе которой выполнено аналитическое и численное моделирование течений в озере Шира. Приведены полученные автором решения для модели Экмана с условием проскальзывания на дне при постоянном и переменном коэффициентах вертикального турбулентного обмена. Соответствующие решения сравниваются с известными решениями для модели Экмана с условиями прилипания на дне. Представлены полученные автором аналитические

решения для модели с учетом горизонтального обмена в двумерном и трехмерном случаях. Решения найдены при постоянном и переменном коэффициентах вертикального турбулентного обмена.

Вторая глава посвящена численному моделированию течений в озере Шира с использованием системы моделирования ROMS (Regional Ocean Modeling System). Представлена адаптация численной модели, реализованной открытым кодом ROMS, к расчету течений в озере Шира, которая включала в себя: создание цифровой модели рельефа дна по нерегулярным данным измерений батиметрии с использованием метода интерполяции бигармоническими сплайнами; анализа широкого класса разностных схем повышенного порядка аппроксимации, применяемых для расчетов в модели ROMS, на основе которого была выбрана схема, дающая на аналитических решениях одномерного и двумерного уравнений конвекции-диффузии наименьшую погрешность численного решения.

Приведены результаты верификации численных алгоритмов ROMS на полученных аналитических решениях упрощенной модели стационарного ветрового движения однородной жидкости.

Представлены результаты численных расчетов с модельным ветром и учетом реальных метеорологических данных в летний период, которые позволили определить условия возникновения, вид и периоды внутренних волн в зависимости от силы и направления ветра. Проведен спектральный анализ измеренных скоростей в озере в летний период и скоростей, полученных при численных расчетах.

В **третьей главе** изложены результаты анализа данных натурных измерений температуры и горизонтальных скоростей течения методом эмпирических ортогональных функций (методом главных компонент). Проведенный анализ позволил определить структуру основного течения в озере и оценить коэффициент вертикального турбулентного обмена.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы, показано, что цель диссертации достигнута путем решения поставленных задач.

В **Приложении 1** приводится описание приборов для измерения скорости течения, которые использовались автором при проведении натурных измерений.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается строгостью математических выкладок; количественными и качественными согласием результатов с результатами других авторов; совпадением спектральных характеристик численных расчетов течений в озере Шира и спектральных характеристик данных натурных измерений.

Научная новизна выносимых на защиту результатов заключается в следующем:

1. Получены новые аналитические решения для оценки ветрового движения жидкости в модели Экмана с условием проскальзывания на дне и в модели стационарного ветрового движения жидкости с учетом

горизонтального турбулентного обмена в двумерном и трехмерном случаях.

2. Выполнен сравнительный анализ широкого класса разностных схем повышенного порядка аппроксимации, применяемых для расчетов в модели ROMS, на основе которого была выбрана схема, дающая на аналитических решениях одномерного и двумерного уравнений конвекции-диффузии наименьшую погрешность численного решения.

3. Разработана методика построения цифровой модели рельефа дна по нерегулярным данным батиметрии, основанная на использовании бигармонической сплайн-интерполяции.

4. Определена динамика основных гидрофизических характеристик озера Шира по результатам численных расчетов и результатам анализа данных натуральных измерений. В частности, определены условия возникновения, вид и периоды внутренних волн в зависимости от силы и направления ветра.

5. На основе численного моделирования и спектрального анализа внутренних волн в озере Шира сделан вывод об устойчивости гидрофизических характеристик в период потери озером свойства меромиктичности.

6. Впервые на основе анализа данных долговременных измерений скоростей течения в озере Шира определена структура течения в эпилимнионе (верхнем прогревом слое) и проведена оценка величины коэффициента вертикального турбулентного обмена.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные аналитические решения могут быть применены для верификации численных моделей ветрового движения жидкости в других водоемах. Созданная система тестов может применяться для тестирования разностных схем и сложных численных алгоритмов решения задач течения неоднородной жидкости.

Комплексное исследование динамики основных гидрофизических характеристик озера Шира позволяет сделать прогноз его экологического состояния с целью сохранения лечебных свойств воды и рекреационного потенциала озера. Разработанная технология построения цифровой модели рельефа дна по нерегулярным данным батиметрии может быть использована при построении цифровой модели дна в других водоемах. Технология построения численной модели неглубокого стратифицированного водоема может быть использована при расчете течений в стратифицированных водоемах, имеющих аналогичные характеристики, например, при исследовании Балтийского моря.

Результаты работы были использованы в проекте РФФИ 15-05-04198 «Наблюдение и моделирование инерционных колебаний в Балтийском и Черном морях».

Апробация результатов.

Результаты исследований по заявленной тематике докладывались на российских и международных конференциях. В библиографическом списке

указано 27 ссылок на опубликованные соискателем работы. Из них 1 монография; 3 публикации в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК; 5 публикаций проиндексировано в базе данных Scopus; 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ; 3 статьи в рецензируемых научных журналах; 13 публикаций в трудах и тезисах всероссийских и международных конференций.

Замечания:

1. стр. 52: Требуется пояснить, почему в расчетах использовано линейное условие (1.1.8') вместо условия (1.1.8).
2. стр. 81-84, 91-92: На графиках на стр. 81-84, 91-92 можно отметить, что в результатах приближения неотрицательных решений некоторыми численными схемами имеются отрицательные значения. Возникают ли подобные артефакты при моделировании динамики температуры (и солености) в озере? Как это сказывается на результатах моделирования?
3. стр. 105-106: Не очень понятно, насколько корректно сопоставление данных измерений за 2014 и 2015 год с расчетами для летнего сценария 2018 года. Это необходимо пояснить.
4. Список литературы: в списке литературы в диссертации [126] и в автореферате [5], вероятно, неправильно указаны авторы.
5. В тексте хотелось бы видеть более детальное обсуждение возможных причин смены режима меромиктичности осенью 2014 - зимой 2015 и обсуждение возможности воспроизведения этого события с помощью модели. Подходит ли использованная модель для моделирования зимнего сценария?

В тексте имеются опечатки.

Заключение.

Диссертационная работа Володько О.С. представляет собой целостное исследование, является законченной научно-квалификационной работой, в которой излагаются новые возможности исследования сложных гидрофизических процессов в озерах, основанные на комплексном подходе и современных методах исследования и моделирования. Основные результаты работы, полученные в диссертации, отвечают сформулированной соискателем цели и поставленным задачам. Сформулированные в диссертации положения и выводы являются обоснованными. Защищаемые положения вытекают из представленных в диссертации и опубликованных в рецензируемых изданиях результатов исследования. Результаты получены автором лично или при определяющем его участии. Содержание автореферата в полной мере передает суть и основные результаты диссертационного исследования.

Диссертация Володько О.С. «Анализ структуры течений в озере Шира в летний период по результатам математического моделирования и натурных измерений» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, удовлетворяет критериям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения

ученых степеней», а ее автор Володько Ольга Станиславовна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., старший научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института вычислительной математики
и математической геофизики
Сибирского отделения
Российской академии наук

Пененко Алексей Владимирович

04 апреля 2022 г.

Шифр специальности, по которой защищена докторская диссертация
Пененко Алексей Владимирович — 05.13.18 — «Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ»

Адрес места работы:

630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 6
Эл. почта: director@sscc.ru
Телефон: +7 (383) 330 83 53

Личную подпись <i>А. В.</i> <i>Пененко</i>	заверяю.
отделом кадров	
Трофимкина Е.Ю.	
«04» 04	2022г.

