

На правах рукописи

Якубайлик

Якубайлик Татьяна Валерьевна

**КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАМКНУТЫХ
СОЛЕННЫХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ОЗЕР
(НА ПРИМЕРЕ ОЗ. ШИРА)**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
Компаниец Лидия Алексеевна

Официальные оппоненты: Воеводин Анатолий Федорович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ИГиЛ СО РАН, г. Новосибирск,
главный научный сотрудник

Платов Геннадий Алексеевич,
доктор физико-математических наук,
ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону

Защита состоится 16 сентября 2014 года в 11:30 на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ИВТ СО РАН: <http://www.ict.nsc.ru/sitepage.php?PageID=17>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИВТ СО РАН.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н.



Лебедев А. С.

Общая характеристика работы

Актуальность. Соленые озера являются важными природными объектами, в которых заключены разнообразные запасы минеральных и биологических ресурсов. Они представляют собой большую экономическую ценность, так как являются одним из основных мест рекреационного туризма, медицинским ресурсом по запасам лечебной грязи и соли. Мировым сообществом признана необходимость «изучения, рационального использования и сохранения природы соленых озер» (Манифест, принятый участниками V Международного симпозиума по изучению соленых озер, Боливия, 1991 г.). Современные соленые озера имеют научное значение как природные седиментологические лаборатории, которые не только хранят записи обо всех палеоклиматических изменениях, но и являются природной площадкой для изучения солеобразующих процессов и изменений окружающей среды.

Исследования соленых озер проводятся по разным направлениям: химия, биология, микробиология, биофизика, гидрофизика. Гидрофизические процессы в значительной мере формируют среду обитания гидробионтов, определяют перенос и седиментацию веществ, интенсивность загрязнения и самоочищения водоёмов. В свою очередь, изучение гидрофизики озер включает в себя построение и исследование математических моделей для однородной и неоднородной жидкости, нахождение аналитических решений упрощенных моделей, численное моделирование, лабораторные и натурные эксперименты. Получили свое развитие и дистанционные аэрокосмические методы исследования озер.

Логическим продолжением может служить объединение нескольких направлений для исследований конкретного водоема, что и обосновывает актуальность данной работы. В диссертационной работе предлагается комплексный подход к исследованию неглубоких замкнутых соленых стратифицированных озер, разработанный и опробованный на изучении гидрофизических характеристик озера Ши́ра. Идея исследования заключается в применении технологии вычислительного и натурального экспериментов для построения моделей, описывающих гидрофизические характеристики изучаемого уникального водного объекта. Методология вычислительного эксперимента разработана в трудах академиков А. А. Самарского, Н. Н. Яненко, Ю. И. Шокина.

Цель работы состоит в создании на основе технологии вычислительного эксперимента комплексной системы моделирования соленых стратифицированных озер, ориентированной на изучение их гидрофизических характеристик и применении ее для изучения ветровых течений в реальном водоеме (озере Ши́ра, расположенном в республике Хакасия).

В соответствии с этой целью в работе поставлены и решаются следующие **задачи**:

1. Выявить общие закономерности течений на основе новых аналитических решений упрощенных гидрофизических моделей ветровых течений в замкнутом водоеме.

2. Создать, в рамках технологии вычислительного эксперимента, программно – технологическое обеспечение для моделирования трехмерных течений в соленых замкнутых стратифицированных озерах.
3. Провести поэтапную адаптацию и верификацию численного алгоритма решения конечно-разностных уравнений модели движения неоднородной жидкости, реализованного в свободно распространяемом пакете программ GETM.
4. Провести исследование ветровых течений для соленых стратифицированных озер на примере озера Шира с использованием созданного программного комплекса, а также по результатам натуральных наблюдений на оз. Шира.
5. Дать оценку гидрофизического режима озера Шира в летний период, используя выявленные закономерности.

Объектом исследований являются физические процессы, специфические для замкнутых стратифицированных соленых водоемов.

Методы исследований: аналитические решения уравнений математической физики; численные решения уравнений математической физики; вычислительный эксперимент; проведение натуральных наблюдений с помощью специализированных современных измерительных приборов; обработка и анализ результатов измерений гидрофизических параметров озера и результатов численного моделирования.

На защиту выносятся следующие результаты, соответствующие паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по физико-математическим наукам:

1. Новые аналитические решения для трехмерной модели движения жидкости с учетом бокового обмена в водоемах простейшей геометрии (*п. 2 паспорта специальности – Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей*).

2. Поэтапная адаптация численного алгоритма к исследованию неглубоких замкнутых стратифицированных озер путем тестирования на вновь полученных аналитических решениях и путем выбора оптимальных параметров расчета (разностной сетки, способов разностной аппроксимации дифференциальных уравнений, уравнения состояния). Валидация математической модели и верификация численного алгоритма путем сравнения с результатами натуральных наблюдений (*п. 3 паспорта специальности – Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий*).

3. Созданная на базе технологии вычислительного эксперимента система компьютерного и имитационного моделирования ветровых течений в соленых замкнутых стратифицированных озерах, включающая в себя комплекс оригинальных программ пре- и пост-процессинга данных натуральных наблюдений и результатов численных экспериментов, обеспечивающий эффективную организацию вычислительных экспериментов, выполняемых с помощью широко используемых в проблемной области средств компьютерного моделирования (GETM, GOTM), и интерпретацию их результатов (*п. 8 паспорта*

специальности – Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования).

4. Результаты комплексного исследования гидрофизических характеристик оз. Ши́ра с применением математического моделирования, численного эксперимента и натуральных наблюдений (*п. 5 паспорта специальности – Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента).*

Научная новизна выносимых на защиту результатов заключается в том, что:

1. Получены новые аналитические решения для оценки ветрового движения жидкости в моделях с учетом горизонтального турбулентного обмена как для однородной, так и для неоднородной (двухслойной) жидкости.

2. В рамках технологии вычислительного эксперимента построена оригинальная комплексная система для трехмерного моделирования течений в соленых замкнутых стратифицированных озерах на основе свободно распространяемого пакета GETM.

3. Впервые получена трехмерная картина распределения полей гидрофизических характеристик в оз. Ши́ра на основе вычислительного эксперимента и сравнения с натурными данными.

4. На основании полного анализа гидрофизических характеристик определен характер течений в озере Ши́ра в летний период, что дает новые знания о процессах перемешивания водной среды.

Значение для теории. Полученные аналитические решения упрощенных моделей движения жидкости в трехмерном случае для постоянного и переменного коэффициента вертикального турбулентного обмена могут применяться для анализа ветровых течений как элемент неразрушающего контроля гидрофизических характеристик озера, а также для тестирования численных алгоритмов. Раскрыты ограничения области применимости модели Экмана по сравнению с изученной в данной работе моделью с учетом бокового обмена. Проведена валидация математической модели, адаптация и верификация широко применяемого в проблемной области численного алгоритма, реализованного на основе свободно распространяемого пакета GETM, для проведения вычислительного эксперимента по моделированию течений в неглубоких замкнутых стратифицированных озерах.

Значение для практики. Использование комплексного подхода на основе технологии вычислительного эксперимента дает возможность наиболее полно исследовать гидрофизические характеристики соленых стратифицированных озер с наименьшими затратами ресурсов и нанося наименьший вред экологической системе озера. Предлагаемый подход может быть использован при оценке влияния антропогенного воздействия на гидробиологический режим соленых стратифицированных озер, а также может быть полезен биологам при исследованиях микробного биоразнообразия.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается строгостью математических выкладок; количественным и каче-

ственным совпадением с результатами других авторов; непротиворечивостью результатов численных расчетов, натуральных данных для озера Шира и полученных аналитических решений; экспериментальным доказательством адекватности математической модели.

Использование результатов диссертации. Результаты, полученные в диссертации, были использованы при выполнении гранта РФФИ № 07 – 01 – 00153 – а, № 13 – 05 – 00853 и междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 95 – 2009, 56 – 2012.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Представленные методики могут применяться в составе комплексной системы при экологическом мониторинге соленых стратифицированных озер, а также при планировании будущих натуральных измерений. Результаты моделирования гидрофизических процессов могут служить базой для исследования химико-биологических характеристик озер.

Представление результатов диссертации. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (Усть – Каменогорск, Казахстан, 2003); Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (Казахстан 2004); IX Всероссийской конференции «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф» (Барнаул, 2007); международной конференции «Современные проблемы математического моделирования и вычислительных технологий -2008» (Красноярск, 2008); Всероссийской конференции «Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение», приуроченной к 90-летию академика Л. В. Овсянникова (Новосибирск, 2009); Международной конференции «Mathematical and Informational Technologies» MIT-2009, 2011 (Копанник, Сербия, 2009; Врнячка Баня, Сербия, 2011); X, XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2010, ГА-2012 (Санкт – Петербург, 2010, 2012); XV, XVI, XVII Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» (Красноярск, 2011, 2012, 2013); VII, VIII Всесибирском конгрессе женщин – математиков (Красноярск, 2012, 2014), Международной конференции «Информационно- вычислительные технологии и математическое моделирование (ИВТ&ММ)» (Кемерово, 2013), Международной научной конференции «Методы создания, исследования и идентификации математических моделей» (Новосибирск, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций в печатных листах, в знаменателе – объем, принадлежащий лично автору): 2 монографии (16,25/4,06), 8 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для представления основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора или кандидата наук (5,0/1,5), 2 – в рецензируемых журналах (1,18/0,52), 8 работ в трудах международных и всероссийских конференций (2,13 /1,01), 1 препринт (3/0,33), 9 из них опубликова-

ны в изданиях, входящих в базу РИНЦ, 3 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент).

Личный вклад автора. Созданная система имитационного моделирования трехмерных течений в соленых замкнутых стратифицированных озерах является итогом исследований, проводимых в ИВМ СО РАН (г. Красноярск), ИБФ СО РАН (г. Красноярск), АО ИО РАН им. Ширшова (г. Калининград).

Аналитические решения для задачи ветрового движения вязкой жидкости исследовались в соавторстве с Л. А. Компаниец, О. С. Володько, Л. В. Гавриловой. Личный вклад автора заключается в получении точного решения для упрощенной гидрофизической модели ветрового движения однородной жидкости в трехмерном случае с постоянным и переменным коэффициентом вертикального турбулентного обмена; в получении точного решения для трехмерной модели ветрового движения неоднородной двухслойной жидкости.

В основе системы вычислительного моделирования лежит пакет GETM, разработанный тремя авторами: Hans Burchard, Karsten Bolding and Lars Umlauf и распространяемый под GNU лицензией. Личный вклад автора заключается в калибровке численной модели с помощью данных натурального эксперимента; в проведении компьютерного моделирования ветровых течений как для водоемов простейшей формы, так и для водоема с батиметрией озера Ши́ра; в интерпретации результатов численного моделирования; в создании набора программ, который позволяет формировать входные файлы, а также извлекать и обрабатывать выходные данные (написанных автором в соавторстве с О. Э. Якубайликом). Все результаты неоднократно обсуждались с Л. А. Компаниец.

Измерения скоростей течений в озере Ши́ра в летний период с использованием доплеровских профилографов проводились как автором лично, так и совместно с О. С. Володько, В. И. Барановым. Измерения других гидрофизических характеристик озера проводились совместно с А. П. Толмеевым. Личный вклад автора состоит в проведении измерений и обработке результатов измерений трехмерного вектора скорости течений, а также обработке результатов измерений температуры и солености.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Работа состоит из 122 страниц основного текста, включая 72 рисунка. Список использованных источников включает 101 наименование.

Содержание работы

Введение раскрывает основные цели и задачи диссертационной работы, ее актуальность, методологию исследования, новизну полученных результатов, теоретическую и практическую значимость. Также во введении перечислены положения, выносимые на защиту, и приведено краткое содержание диссертации по главам.

В главе 1 кратко представлены модели, которые применяются для описания гидрофизических характеристик неглубоких соленых озер. Приведена модель, выбранная автором для исследования ветровых течений в водоемах. Даны полученные автором аналитические решения для некоторых упрощенных моделей задач гидрофизики мелких соленых водоемов в случае однородной и неоднородной жидкости.

В параграфе 1.1 проведен обзор моделей для определения ветрового течения в замкнутых водоемах. Обоснован выбор одной из них, взятой в качестве базовой для моделирования ветрового течения в различных водоемах (морях, водохранилищах, озерах).¹

Это трехмерная математическая модель, описывающая движение жидкости в водоеме в приближениях Буссинеска и гидростатики

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - lv = \\
 & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h^M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h^M \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^M \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\zeta \rho dz, \\
 & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + lv = \\
 & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h^M \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h^M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^M \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\zeta \rho dz, \\
 & \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h^T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^T \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h^S \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h^S \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^S \frac{\partial S}{\partial z} \right).$$

Здесь u , v и w являются компонентами скорости относительно направлений x , y и z соответственно. Вертикальная координата z находится в диапазоне от дна $-H(x, y)$ до поверхности $\zeta(t, x, y)$, t – время, K_z^M – коэффициент вертикального турбулентного обмена, l – параметр Кориолиса, g – ускорение свободного падения; ρ – плотность и ρ_0 – средняя плотность. Горизонтальное перемешивание параметризуется членами, содержащими коэффициент горизонтального турбулентного обмена K_h^M , T – температура, S – соленость, K_z^T , K_z^S , K_h^T , K_h^S – коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии.

¹ Марчук, Г. И. Математическое моделирование циркуляции океана / Г. И. Марчук, А. С. Саркисян. – М.: Наука, 1988.

Система уравнений дополнена граничными условиями. На свободной поверхности при $z = \zeta(t, x, y)$ ставятся следующие условия:

$$\rho_0 K_z^M \frac{\partial u}{\partial z} = \tau^x, \quad \rho_0 K_z^M \frac{\partial v}{\partial z} = \tau^y, \quad w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0.$$

Поверхностные напряжения τ^x и τ^y вычисляются как функции скорости и направления ветра.

Так как рассматриваются только замкнутые водоемы, на боковых границах ставится условие равенства нулю нормальной составляющей горизонтального вектора скорости. Граничные условия для скорости на дне ставятся в зависимости от решаемой задачи (проскальзывания, прилипания), для температуры и солености ставится условие отсутствия потоков соответствующих величин.

В общем случае система замыкается при помощи уравнения состояния:

$$\rho = \rho(T, S).$$

В параграфе 1.2 автором получены новые аналитические решения для модели с учетом бокового обмена в водоеме простой геометрии (бассейн прямоугольной формы). Сравнение их с аналитическими решениями для модели Экмана позволяет определить, в какой области можно применять решение более простой модели Экмана.

Аналитические решения для трехмерной модели стационарного ветрового движения вязкой однородной жидкости в замкнутом водоеме при различных коэффициентах вертикального турбулентного обмена (коэффициент вертикального турбулентного обмена постоянен или изменяется по глубине либо по линейному, либо по экспоненциальному закону) были найдены при некоторых упрощающих предположениях: жидкость является однородной; коэффициенты горизонтального турбулентного обмена – величины постоянные; отклонение свободной поверхности от невозмущенного положения малò, влияние ветра можно рассматривать на невозмущенной поверхности бассейна; существует стационарное решение уравнений.

Решение в комплексной форме для прямоугольного бассейна постоянной глубины имеет вид

$$W = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} (c_{1n,m} e^{\sqrt{\alpha_{n,m}} z} + c_{2n,m} e^{-\sqrt{\alpha_{n,m}} z} + c_{3n,m} d_{n,m}) \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y, \quad (2)$$

$$\alpha_{n,m} = \frac{K_h^M \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + K_h^M \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + il}{K_z^M}.$$

Здесь $W = u + iv$, a и b – длина и ширина бассейна, i – мнимая единица, $c_{1n,m}$, $c_{2n,m}$, $c_{3n,m}$, $d_{n,m}$ – числовые коэффициенты, вычисленные из системы уравнений, полученной подстановкой (2) в уравнения движения, записанные в комплексном виде, и в уравнение для свободной поверхности с учетом граничных условий. Примеры полученного при таких условиях решения показаны на рисунке 1.

Приведены полученные аналогичным образом решения для прямо-

угольного бассейна с ровным дном, движение в котором возбуждается ветром с напряжением трения, задаваемым формулами: $\tau^x/\rho_0 = -y$, $\tau^y/\rho_0 = x$.

Получены также решения для модели с учетом бокового обмена при переменном коэффициенте вертикального турбулентного обмена (линейно или экспоненциально меняющемся по глубине), наклоны свободной поверхности не учитывались.

Проведено сравнение с аналитическими решениями для модели Экмана, позволившее оценить область достоверности решения, получаемого по более простой модели Экмана (при конкретных параметрах).

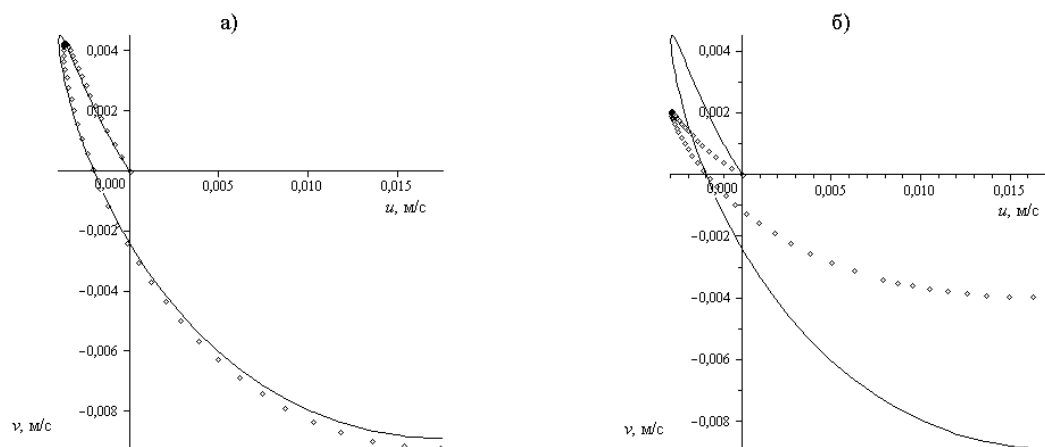


Рисунок 1 – Годограф скорости а) в центре бассейна и б) вблизи берега. Непрерывной линией показано решение по модели Экмана, ромбиками – по модели с учетом бокового обмена

Найдены аналитические решения для упрощенной модели движения неоднородной жидкости, когда жидкость является двуслойной, перенос массы через границу раздела слоев отсутствует, наклоны свободной поверхности считаются равными нулю; верхний и нижний слои однородны, но с разными плотностями; коэффициенты вертикального турбулентного обмена постоянны в каждом слое, но не равны между собой.

В главе 2 приведен обзор численных моделей, используемых для расчета течений в озерах. Обоснован выбор численной модели, которая легла в основу программно-имитационного комплекса для моделирования течений в замкнутых стратифицированных озерах, а также приведен анализ результатов численных расчетов.

В параграфе 2.1 дан обзор численных моделей, используемых для расчета гидрофизических параметров в водоемах. В конце XX века произошел переход от отдельных численных расчетов, выполняемых каждым автором или коллективом авторов по своей собственной численной модели, к глобальным моделям, позволяющим обрабатывать разномасштабные течения (от океанов до мелких небольших внутренних водоемов и рек). Появилось большое количество разнообразных численных моделей, большинство которых в основе своей имеет трехмерную математическую модель уравнений гидрофизики в приближении гидростатики. Особенности отдельных численных моделей являются способы дискретизации уравнений, выбор конкретной аппроксимации (они могут быть как конечно-разностные, так и конечно-

элементные), реализации численного алгоритма. Отдельные варианты включают в себя возможность исследования биологических процессов. Большинство из них находится в свободном доступе в сети Internet, запрещено для коммерческого использования, но открыто для исследовательских целей. Программу GETM (General Estuarine Transport Model) попытались сделать так, чтобы она была наиболее общей, то есть позволяла рассчитывать большое разнообразие течений в водных объектах, включая осушение и затопление. Программа GOTM (General Ocean Turbulence Model) является составной частью GETM и предназначена для расчета вертикального перемешивания.

Она использовалась в работах европейских ученых для расчетов стратификации во фьордах Норвегии, для расчета переноса примесей в северо-западной части Северного моря и т. д., в работах российских исследователей для расчета водоемов-охладителей Шатурской ГРЭС.

В **параграфе 2.2** изложена модель, лежащая в основе GETM (являющаяся модификацией системы уравнений (1)), дано описание программ GETM и GOTM – как составной части GETM. Приведена система уравнений, используемая в этой программе, а также способы дискретизации данных уравнений по горизонтали и вертикали; представлен численный алгоритм; изложен формат NetCDF, который используется для записи входных и выходных данных. Приведено описание набора программ, которые позволяют формировать входные файлы в данном формате, а также извлекать выходные данные в удобном виде для их дальнейшей обработки и визуализации.

В **параграфе 2.3** численный алгоритм адаптирован для расчета течений в неглубоких стратифицированных замкнутых озерах и верифицирован. Адаптация разностного алгоритма к расчету течений в рассматриваемых водоемах проведена путем выбора оптимальных параметров (разностной сетки, способов разностной аппроксимации дифференциальных уравнений, уравнения состояния). Верификация описанного выше численного алгоритма проведена на вновь полученных аналитических решениях (см. главу 1), сравнении с расчетами других авторов и на расчетах для модельных водоемов с простой батиметрией: цилиндра, прямоугольника, параболоида.

Глава 3 посвящена разработке комплексной системы моделирования гидрофизических процессов в соленых замкнутых стратифицированных озерах и ее применению к озеру Ши́ра. Рассмотрена сама система и составляющие ее компоненты. Приведена краткая характеристика озера Ши́ра. Озеро расположено в республике Хакасия и представляет собой бессточное озеро без островов, в которое впадает одна речка Сон. В силу малости притока все влияние реки сосредоточено в приустьевой зоне, поэтому основным внешним фактором, определяющим течение в озере, является ветровое воздействие.

Дано общее описание выполненных натуральных экспериментов. Проведен вычислительный эксперимент для озера Ши́ра, который включает в себя сравнение с результатами натуральных наблюдений. Показана работоспособность системы для конкретного озера.

В **параграфе 3.1** разработана структура программно-технологического

обеспечения для выполнения вычислительного эксперимента по моделированию ветровых течений в озере Шира в летний период.

Следуя хорошо известной технологической цепочке вычислительного эксперимента, создана система комплексного моделирования соленых стратифицированных озер, общая схема которой дана на рисунке 2. Основой системы является совокупность натуральных и модельных данных разного вида, в том числе данных батиметрии, по которым построена цифровая модель рельефа дна. На схеме (рисунок 2) стрелочками показаны основные направления потоков данных.



Рисунок 2 – Схема комплексной системы моделирования

Оценка общих закономерностей течения проводится на основе аналитических решений упрощенных математических моделей. Входными данными для трехмерного численного моделирования течений являются результаты натуральных наблюдений (батиметрия, скорость и направление ветра, поля температуры и солености). На первом этапе выполняется предобработка данных с помощью специально разработанных программ. Далее проводится вычислительный эксперимент с последующим сравнением результатов численного моделирования с натурными данными (скорости, наличие и вид внутренних волн). Используются авторские программные средства для обработки и визуализации данных, полученных в результате моделирования (см. свидетельства о регистрации).

В параграфе 3.2 кратко сформулированы методики проведения натуральных экспериментов, которые выполнены на озере Шира в 2009 – 2013 гг. Представлены результаты обработки данных натуральных наблюдений, в том числе авторские.

Автором построена цифровая модель рельефа, которая приведена в виде карты изолиний (рисунок 3, слева). Обработаны данные измерений температуры и кондуктивности. Пример результатов обработки представлен на рисунке 4, на котором слева изображен график распределения температуры и солености в различных точках озера, типичного в летний период. Разным цветом показано измерение температуры и солености в точках с различной глубиной в период со второго по седьмое июля 2011 г.

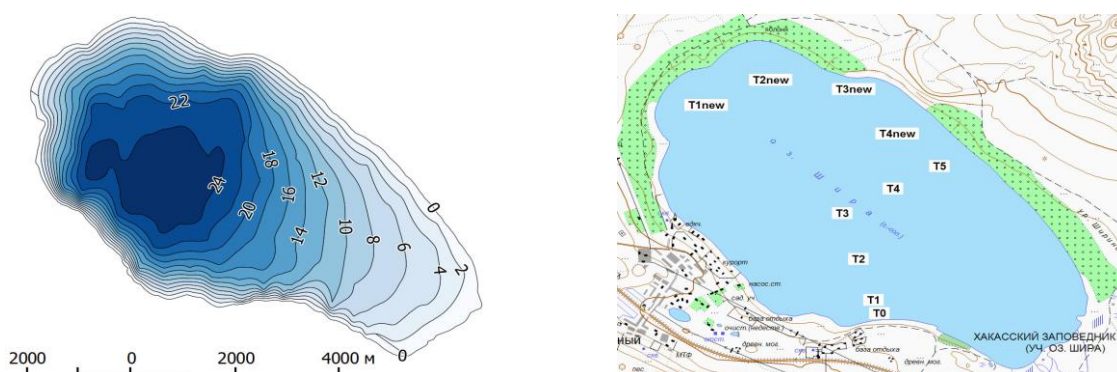


Рисунок 3 – Цифровая модель рельефа оз. Шира (слева), картина установки датчиков на озере в июне – июле 2013 г. (справа)

На основании обработки точечных измерений температуры и кондуктивности получен график зависимости плотности от глубины, который наглядно демонстрирует сильную стратификацию воды в озере Шира (рисунок 4, справа).

Картина колебания изотерм на рисунке 5 (типичная для течения в присутствии внутренних волн²) подтверждает возможность их возникновения в озере Шира при определенных метеорологических условиях.

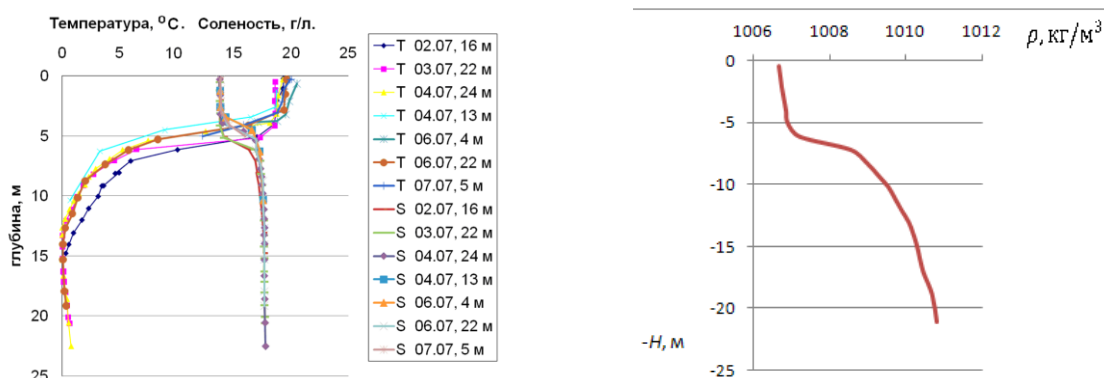


Рисунок 4 – Типичное распределение температуры и солености (слева), плотности воды (справа), в зависимости от глубины, в летний период на оз. Шира

² Hutter, K. Physics of lakes / K. Hutter, Y. Wang, I.P. Chubarenko. - Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – V 1.

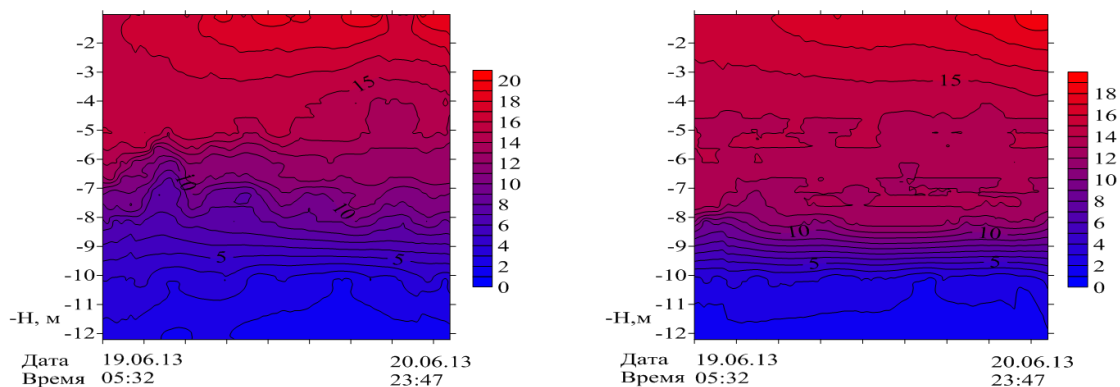


Рисунок 5 – Данные с термисторных распределенных датчиков в точках Т1 (слева) и Т3 (справа), изображенных на рисунке 3

В параграфе 3.3 выполнен вычислительный эксперимент на основе комплексной системы для конкретного уникального водоема (озера Шира). Приведены результаты численных расчетов при постоянном ветре и проведено сравнение с натурными данными. Начальное распределение температуры и солености соответствовало реальному распределению этих величин в оз. Шира. При постоянном южном ветре 5 м/с в расчетах были получены следующие результаты.

Показано, что на расчетный период времени, даже при наличии горизонтальных скоростей на дне, нижний и верхний слои не перемешиваются, что иллюстрируют графики температуры на рисунке 6. Как и в натурных наблюдениях, в численных расчетах горизонтальные скорости два раза меняют знак в распределении по глубине (рисунки 7 и 9, рисунки 8 и 10).

В параграфе 3.4 проведены вычислительные эксперименты на основе комплексной системы для сценария переменного ветра. Проведено сравнение результатов натурных измерений и численных расчетов при нестационарном ветре.

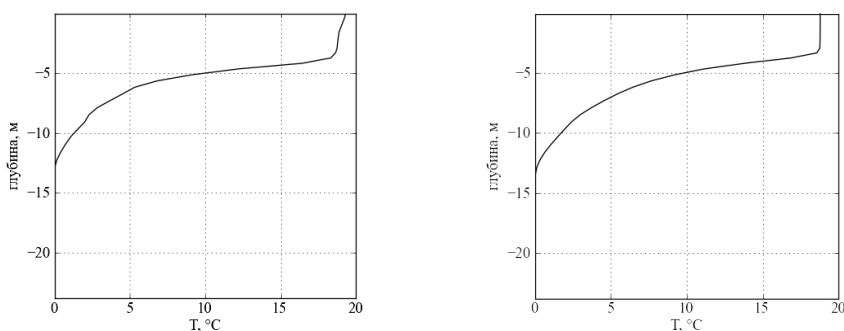


Рисунок 6 – Характерные профили распределения температуры по глубине в центральной точке бассейна в начале и в конце расчета

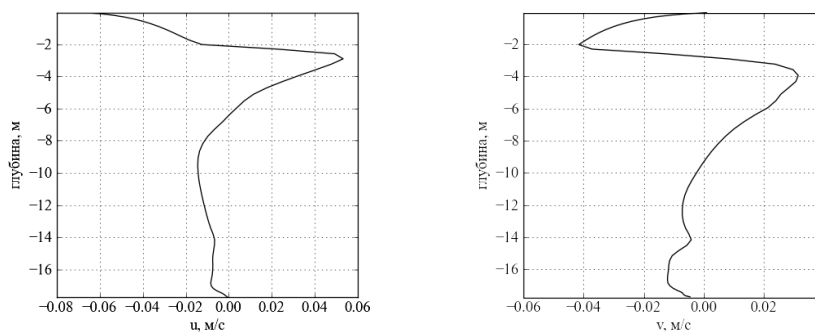


Рисунок 7 – Профили скоростей в точке глубиной 16 м, полученные в результате расчетов

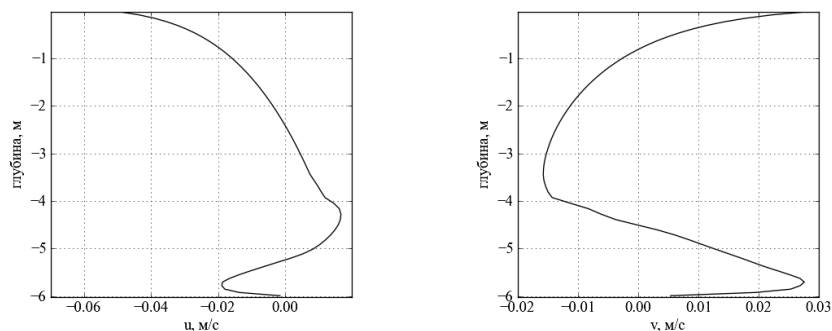


Рисунок 8 – Профили скоростей в точке глубиной 5,8 м, полученные в результате расчетов

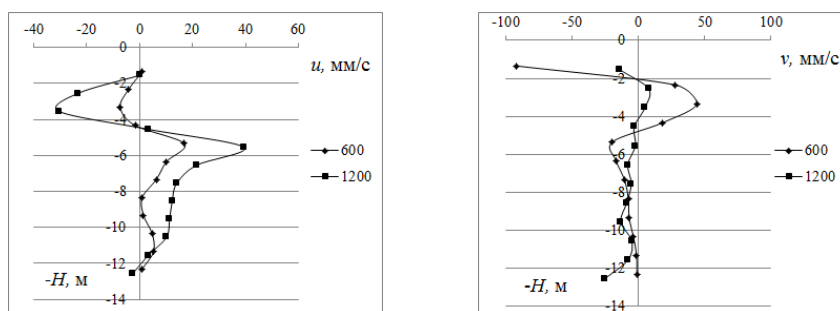


Рисунок 9 – Измерения 03.07.10 г. Точка имеет широту $54^{\circ}30.392'$, долготу $90^{\circ}09.249'$, глубина 16 м. ADCP 1200 установлен излучателями вниз, ADCP 600 установлен излучателями вверх

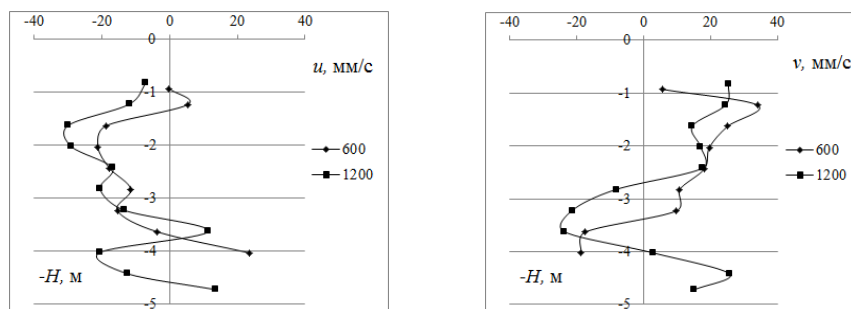


Рисунок 10 – Измерения 04.07.10 г. Точка имеет широту $54^{\circ}30.295'$, долготу $90^{\circ}15.195'$, глубина 5.5 м. ADCP 1200 установлен излучателями вниз, ADCP 600 установлен излучателями вверх

Пример обработки результатов одного из вычислительных экспериментов приведен на рисунке 11, когда расчет начинался при стационарном ветре 6 м/с в течение 6 часов, затем 1 час при ветре 11 м/с, далее расчет

продолжался при отсутствии ветра – что является моделью реальной ветровой картины на один из периодов времени натуральных наблюдений по данным метеостанции в районе Ши́ра.

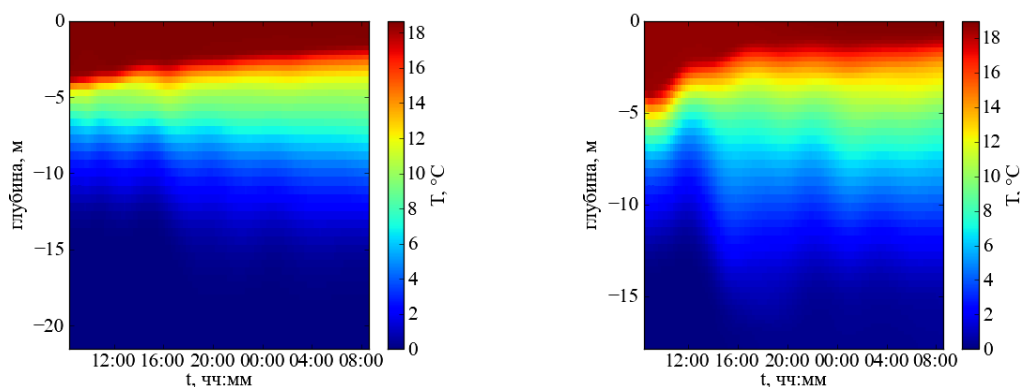


Рисунок 11 – Изотермы, полученные в расчетной точке, ближайшей к Т1 (слева) и к Т3 (справа) (рисунок 5) в бассейне с батиметрией оз. Ши́ра при переменном ветре

Продемонстрировано, что эффект, показанный на рисунке 5 (когда амплитуда колебаний изотерм в толще жидкости больше, чем на поверхности), можно получить при моделировании гидрофизического режима озера Ши́ра с использованием системы комплексного моделирования при переменном ветре (см. рисунок 11). Доказательством работоспособности системы является то, что с её помощью удалось получить результаты, хорошо согласующиеся с данными натуральных наблюдений.

В заключении перечислены **основные результаты**:

1. Получены новые аналитические решения для трехмерной модели движения однородной жидкости с учетом бокового обмена в водоемах простейшей геометрии, а также для модели движения двухслойной жидкости с учетом бокового обмена без учета наклонов возвышения свободной поверхности.
2. Впервые на основе технологии вычислительного эксперимента создана система компьютерного моделирования ветровых течений в неглубоких соленых замкнутых стратифицированных озерах, включающая в себя обработку и анализ результатов натуральных наблюдений и результатов численных экспериментов.
3. Комплексное исследование гидрофизических характеристик озера Ши́ра с применением средств математического моделирования и технологии вычислительного эксперимента позволило: обосновать возможность появления внутренних волн в озере Ши́ра в летний период; выявить существенно трехмерный характер течения в озере с образованием при определенных метеорологических условиях горизонтальных вихревых структур.

В приложении описаны приборы и методики проведения натуральных измерений, результаты обработки полученных данных. Изложена технология уточнения батиметрии озера при помощи эхолота и доплеровских профилографов в режиме «bottom track». Представлены данные трехмерного вектора скорости течения, полученные с доплеровских профилографов по поперечным разрезам озера Ши́ра. Построены графики точечных измерений темпе-

ратуры и кондуктивности, выполненные при помощи CTD (conductivity, temperature, depth) зондов. Отображены результаты измерений CTD зондом IDRONAUT по галсам с системой промерных станций на расстоянии 500 м для получения информации о температуре и солености по поперечным разрезам озера. Приведены результаты обработки измерений температурных датчиков.

Публикации автора по теме диссертации

Монографии:

1. Модели экмановского типа в задачах гидродинамики / Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик, Л. В. Гаврилова, К. Ю. Гуревич – Новосибирск: Наука. – 2007.
2. Аналитические решения для задач стационарного ветрового движения жидкости / Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик, Л. В. Гаврилова, О. С. Володько – Красноярск: Изд-во СФУ. – 2012.

В рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК:

1. Компаниец, Л. А. Аналитическое решение одной модели ветрового движения жидкости / Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик // Вычислительные технологии. – 2003. – Т.8. – № 5. – С. 78 – 83.
2. Белолипецкий, В. М. Математические модели и численные алгоритмы для исследования задач гидрофизики / В. М. Белолипецкий, С. Н. Генова, Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик // Вычислительные технологии. – 2004. – Т.9. – (Специальный выпуск, посвященный 30-летию Института вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН) – С. 22 – 28.
3. Компаниец, Л. А. Сравнительный анализ двух моделей двухслойной жидкости в приближении Экмана / Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик, К. Ю. Гуревич, Л. В. Гаврилова, Е. А. Кирилук // Журнал Сибирского федерального университета. – 2008. – Т. 1. – №2. – С. 197 – 209.
4. Компаниец, Л. А. Аналитическое решение одной модели ветрового течения вязкой жидкости / Л. А. Компаниец, О. С. Питальская, Т. В. Якубайлик // Вычислительные технологии. – 2009. – Т.14. – № 4. – С. 46 – 57.
5. Компаниец, Л. А. О модели ветрового движения двухслойной вязкой жидкости / Л. А. Компаниец, Л. В. Гаврилова, Т. В. Якубайлик // Компьютерные исследования и моделирование. – 2009. – Т. 1. – №4. – С. 381 – 390.
6. Компаниец, Л. А. Аналитическое решение одной модели ветрового движения вязкой жидкости (трехмерный случай) / Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик, О. С. Питальская // Вычислительные технологии. – 2011. – Т.16. – № 3. – С. 50 – 63.
7. Компаниец, Л. А. Анализ характеристик озера Шира на основе натуральных наблюдений / Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик, О. С. Володько // Вестник Бурятского государственного университета: математика, информатика. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ. – 2012. – выпуск 9. – С. 167 – 176.

8. Баранов, В. И. Пространственно-временная изменчивость основных характеристик озера Шира в сезоне 2011-2012 гг. / В. И. Баранов, Н. Н. Голенко, Л. А. Компаниец, В. Т. Пака, Т. В. Якубайлик // Вестник Бурятского государственного университета. Математика. Информатика. – Т.9. – 2013. – С. 148 – 156.

В рецензируемых журналах:

1. Гаврилова, Л. В. Аналитическое решение одной модели движения однородной жидкости в мелком водоеме (2D и 3D случай) / Л. В. Гаврилова, Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик // Вычислительные технологии. – 2003. – Т. 8. – Региональный вестник Востока. – 2003. – № 3. – (Совм. выпуск по материалам Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». Ч. 4.). – С. 125 – 131.
2. Компаниец, Л. А. Аналитическое решение одной модели ветрового движения двухслойной жидкости./ Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик // Вычислительные технологии (совместный выпуск с Вестник КазНУ, №3 (42), 2004г.). – Алматы. – Новосибирск. – 2004. – Т.9. – Часть II. – С. 372 – 383.

В трудах конференций:

1. Yakubailik, T. V. On some analytical solutions for the model of the wind-induced motion of the viscous incompressible liquid (the case of three dimensions) / T. V. Yakubailik, L. A. Kompaniets // Mathematical and Informational Technologies – MIT 2009 (August, 27 - 31, 2009, Kopaonik, Serbia; August, 31 - September, 5, 2009, Budva, Montenegro) // Conference Information, Univerzitet u Prištini, Prirodno-matematički fakultet, Kosovska Mitrovica. – 2009. – P. 113 – 114.
2. Компаниец, Л. А. Опыт использования современных измерительных приборов для определения гидродинамических режимов водоема / Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик, О. С. Питальская // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2010. – СПб: Наука. – 2010. – С. 310 – 312.
3. Компаниец, Л. А. Численное моделирование гидрофизических процессов в озере Шира в летний период / Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик // Zbornik radova Konferencije MIT 2011. – Beograd: Alfa univerzitet; Kosovska Mitrovica: Društvo matematičara Kosova i Metohije, Serbia; Novosibirsk: Institute of Computational Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2012 (Kraljevo: Graficolor). - 404 str. – ISBN 978-86-83237-90-6 (AU). – P. 198 – 202.
4. Володько, О. С. Исследование гидротермических режимов непроточного стратифицированного водоема с использованием доплеровских профилографов / О. С. Володько, Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2012 – СПб: Наука. – 2012. – С. 271 – 274.
5. Якубайлик, Т. В. Теоретическое обоснование возможности появления внутренних волн в оз. Шира / Т. В. Якубайлик, Ю. Б. Гульденбалк, Л. А. Компаниец // Избранные труды международной конференции по изме-

рениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS. – 24 июня-2 июля. – Иркутск. – 2012. – С. 104-107.

6. Гульденбалък, Ю. Б. Анализ натуральных данных для одного из сценариев течения в озере Шира в летний период / Ю. Б. Гульденбалък, Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик // Актуальные проблемы науки и образования: прошлое, настоящее, будущее: Сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции 29 марта 2012 г. – Тамбов. – 2012. – С 59 – 64.

7. Якубайлик, Т. В. Калибровка численной модели для расчета гидрофизических характеристик озера Шира с использованием натуральных данных // Материалы конференции «VII всесибирский конгресс женщин – математиков». – Красноярск: СибГТУ. – 2012. – С. 245 – 249.

8. Якубайлик, Т. В. Численное моделирование поведения внутренних волн в прибрежной зоне неглубокого стратифицированного водоема / Т. В. Якубайлик, Л. А. Компаниец // Теоретические и прикладные вопросы науки и образования. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 августа 2013 г. – Тамбов: Изд-во ТРОО. – 2013. – С. 54 – 58.

Местные издания:

1. Компаниец, Л. А. Теоретические и экспериментальные исследования скоростного режима озера Шира в летний период / Л. В. Гаврилова, Л. А. Компаниец, Т. В. Якубайлик // Препринт ИВМ СО РАН. – Красноярск. – 2012. – №12. – 3.

Свидетельства о государственной регистрации программ:

1. Якубайлик О. Э., Якубайлик Т. В. Программа для систематизации полей температуры по результатам численного моделирования замкнутых соленых стратифицированных озер // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610077 от 9 января 2014 г.

2. Якубайлик О. Э., Якубайлик Т. В. Программа формирования данных батиметрии для численного моделирования течений в соленых замкнутых стратифицированных озерах // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610113 от 9 января 2014 г.

3. Якубайлик О. Э., Якубайлик Т. В. Программный комплекс обработки данных результатов численного моделирования замкнутых соленых стратифицированных озер // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610060 от 9 января 2014 г.

Якубайлик Татьяна Валерьевна

Комплексная система моделирования гидрофизических характеристик замкнутых
солёных стратифицированных озёр (на примере оз. Шира)

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Подписано в печать 12.05.2014. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография ИВМ СО РАН