

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ**

**им. М.А. Лаврентьева**

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

(ИГИЛ СО РАН)

Академика Лаврентьева проспект, 15, Новосибирск, 630090  
Тел./ факс: (383) 333-16-12. E-mail: igil@hydro.nsc.ru  
ОКПО 03533978; ОГРН 1025403648600;  
ИНН/КПП 5408100064/540801001

№ 15320—

На № \_\_\_\_\_

Г  
Председателю диссертационного  
совета Д 002.040.01 на базе ФГБУН  
Институт водных проблем Российской  
академии наук

члену-корреспонденту РАН  
В.И. Данилову-Данильяну

ул. Губкина, 3  
г. Москва,  
119333

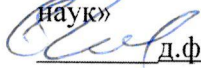
Г  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГИЛ СО РАН) выражает согласие выступить в качестве ведущей организации по диссертации Асламова Ильи Александровича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Теплообмен на границе вода-лед и структура подледного слоя воды в озере Байкал» по специальности 25.00.27 – «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия» и представить официальный отзыв.

Директор  
д.ф.-м.н.

С.В. Головин

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки «Институт  
гидродинамики имени  
М.А. Лаврентьева Сибирского  
отделения Российской академии  
наук»

 д.ф.-м.н. С.В. Головин

«\_\_» марта 2019 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук»

о диссертационной работе Асламова Ильи Александровича «Теплообмен на границе вода-лед и структура подледного слоя воды в озере Байкал»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.27 – «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия».

Диссертационная работа Асламова И.А. посвящена комплексному исследованию процессов тепломассопереноса в системе вода-лёд и структуры подледного слоя воды в крупном, глубоком пресноводном водоеме на примере озера Байкал.

В современной лимнологии наблюдается рост интереса к исследованиям сложного комплекса явлений, имеющих место в озерах в период существования ледового покрова. Этот интерес стимулируется необходимостью изучения отклика крупных водных объектов на долговременные изменения климата, для чего требуется как разработка адекватных математических моделей для количественного описания изменения толщины ледового покрова, так и обеспечение этих моделей данными измерений температуры в ледовом покрове и тонком подледном слое воды, собранными в контексте непрерывного мониторинга сложного комплекса физических процессов, включающих в себя поглощение солнечной радиации, фазовые переходы на границе вода-лёд, изменение температуры в воздухе, толще ледового покрова и подледном слое воды, а также изменение интенсивности течений и турбулентности в водной толще. Проведение соответствующих исследований требует разработки аппаратно-программных комплексов, реализующих такой мониторинг, постановки натурных экспериментов и выполнения интерпретация полученных данных с помощью решения корректно поставленных прямых и обратных задач математического моделирования динамики ледового покрова. **Актуальностью** вышеупомянутых тем и объясняется проведение диссертационного исследования. Тематика диссертации Асламова И.А. актуальна в контексте **планов** развития Российской Федерации, закрепленных в Стратегии научно технологического развития, утвержденной указом Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642. В частности, тематика диссертации соответствует таким направлениям Стратегии, как: переход к передовым цифровым технологиям, создание систем обработки больших объемов данных, переход к высокопродуктивному и экологически чистому аквахозяйству, повышение связанности территории РФ, освоение Мирового океана, Арктики и Антарктики.

## **Оценка содержания диссертации.**

Рецензируемая диссертационная работа характеризуется полнотой, завершенностью и систематическим подходом к исследованию и изложению материала. Текст диссертации состоит из введения, шести глав, заключения, содержащего основные результаты и выводы, и списка литературы.

Во **введении** дан обзор литературы, обосновывающий актуальность исследуемой темы, сформулированы цель и задачи работы, описана структура диссертации, кратко изложено содержание, приведены сведения об апробации, новизне и научной значимости работы, публикациях по теме диссертации.

В **первой** главе приведен обзор методов измерения толщины льда и моделей количественного описания тепловых процессов, определяющих динамику роста толщины ледового покрова. Сформулированы выводы о наиболее перспективных направлениях исследования, определивших тематику, цель и задачи диссертации.

Во **второй** главе приведено подробное описание устройства разработанного автоматизированного аппаратно-программного комплекса для регистрации вертикального распределения температуры в воздухе, толще льда, и подледном слое воды; поступающей и проходящей под слой снега и ледовый покров солнечной радиации, а также толщин снежного и ледового покровов. Подробно описана конструкция подледного измерителя толщины льда и метода обработки акустического сигнала.

В **третьей** главе описаны приборы, методы и районы исследований. Для проведения натурного исследования выбраны районы с контрастными условиями по степени заснеженности и скоростям подледных течений. Проведен анализ данных мониторинга распределения температуры в системе воздух-лед-вода, толщине льда, приходящей и проходящей под лед солнечной радиации, а также скоростях подледных течений. Из данных двадцати станций, установленных на Байкале с 2008 по 2018 годы, выбраны и подробно описаны наиболее показательные эксперименты 2016 и 2017 года, приведены также измерения на небольшом озере Килписъярви на севере Финляндии в 2018 году. Хочется отметить высокое качество собранных данных и наглядность их представления в диссертации.

В **четвертой** главе описывается разработанная в диссертации математическая модель изменения толщины ледового покрова. Модель использовалась в двух вариантах. Прямое решение одномерной двухфазной задачи Стефана с заданными коэффициентами применялось для оценки влияния температуры воздуха, солнечной радиации и теплообмена в толще льда и подледной воде на изменчивость температуры в системе вода-лед и скорость нарастания ледового покрова. Начальные и граничные условия при постановке краевой задачи вычислены по экспериментальным данным, для определения необходимых параметров привлечены также надежные эмпирические зависимости, известные из литературы. Решение обратной задачи Стефана на основе измеренных толщин льда, солнечной радиации и температур в системе лед-вода использовалось для расчета коэффициентов эффективной теплопроводности и оценки вертикального распределения потоков тепла. Показана хорошая корреляция измеренных и расчетных данных. Модель применена для изучения динамики ледового покрова в районе существования кольцевых структур в предположении их осесимметричности. Выполнена параметризация необходимых для решения задачи коэффициентов обмена.

В **пятой** главе описана структура пограничного слоя подледной воды, приведено обсуждение результатов экспериментов по измерению скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (ТКЭ). Выполнена оценка баланса ТКЭ (продукции и диссипации) в зависимости от расстояния от нижней поверхности ледового покрова. Показано наличие слоя постоянного турбулентного напряжения («логарифмического» слоя) под ледяным покровом озера Байкал. Наличие логарифмического слоя позволило оценить шероховатость нижней поверхности льда. Полученное значение приблизительно на порядок меньше, чем шероховатость морского льда. Выполнены измерения ТКЭ в небольшом арктическом озере. Измерения показали тесную связь между скоростью ветра над ледовым покровом и интенсивностью турбулентности подо льдом. Спектральный анализ сигнала показал существенный вклад сейш в генерацию турбулентности при высоких скоростях ветра. Показано, что при этом энергетика перемешивания может увеличиваться на порядок, по сравнению со штилевыми условиями.

В **шестой** главе описывается теплообмен на границе вода-лед. В диссертации впервые для оценок тепловых потоков использованы несколько разных методов расчета: по толщине льда и тепловому потоку, по градиенту температуры в ламинарном слое, по течениям и турбулентному обмену в подледном слое воды; по решению обратной задачи модели динамики толщины ледового покрова. Сочетание различных методов расчета существенным образом повышает надежность полученных оценок. Показано, что типичные значения тепловых потоков для Байкала существенно выше, чем на малых озерах, причем имеется существенная зависимость от скорости подледных течений. Сделан вывод о ключевом значении сдвиговой неустойчивости в горизонтальных течениях подо льдом как основном механизме переноса тепла от воды в лед в зимних условиях. Доля потока тепла за счет конвекции при повышении минерализации прилегающего к льду слоя воды незначительна, а объемное поглощение солнечной радиации и связанное с ним повышение турбулентного обмена становится существенным только в весенний сезон. Установлена прямая зависимость между средней скоростью течения и интенсивностью турбулентности подо льдом.

В **выводах** сформулированы **основные результаты** диссертационной работы, среди которых следует отметить следующие:

1. Разработан комплекс специализированного оборудования для исследования вертикального тепломассообмена на границе вода-лёд.
2. Определены толщина вязкого ламинарного слоя подледной воды и положение границы переходного слоя к основной турбулентной водной массе. Показано, что положение границы переходного слоя ощутимо зависит от скорости подледных течений. Показана значительная роль подледной циркуляции в формировании потока тепла на нижней границе льда в сравнении с другими механизмами. Получены оценки коэффициентов эффективной теплопроводности в оз. Байкал и малом озере.
3. Из численного решения обратной задачи Стефана получены вертикальные распределения эффективной теплопроводности. Впервые проведено сопоставление величин плотности потока тепла, полученных разными методами. Показано, что поток тепла из воды в лед составляет существенную величину в сравнении с величиной потока тепла во льду и пренебрежение им может привести к существенным ошибкам при моделировании.
4. Показана существенную роль сильных ветровых явлений в переносе тепла в подледном слое воды в малом озере в весенний период. Баротропные колебания были идентифицированы как механизм передачи кинетической энергии от ветра к

подледной турбулентности, повышая ее значения на один-два порядка, до значений, сравнимых с полученными на оз. Байкал.

5. Путем измерения скорости диссипации ТКЭ доказано наличие слоя постоянного турбулентного напряжения («логарифмического» слоя) подо льдом озера Байкал, получены оценки диапазона скоростей течений, при которых формируется логарифмический слой, определены количественные характеристики пограничного слоя, впервые получена оценка параметра шероховатости нижней поверхности льда.
6. Установлена прямая зависимость между средней скоростью течения и интенсивностью турбулентности подо льдом. Показано, что поток тепла на границе вода-лед может быть достоверно восстановлен на основании температуры воды и скорости течения на определенном горизонте.

Все результаты были получены впервые и не имеют аналогов в других работах.

**Научная новизна** диссертации состоит в следующем:

1. В диссертации разработано эффективное программно-аппаратное решение задачи о создании системы сбора данных, позволившее создать пространственно-распределенную косу адресуемых температурных датчиков, работающих на общей четырехпроводной шине, что дает возможность гибко расширять количество датчиков в косе и свободно планировать их пространственное расположение.
2. Разработан гидроакустический метод измерения толщины ледового покрова по принципу обратного эхолота. Метод имеет высокое пространственное разрешение, достигаемое за счет использования фазоманипулированного зондирующего импульса, в сочетании с современными способами цифровой обработки и корреляционного детектирования сигнала.
3. Разработанный измерительный комплекс позволяет определять поглощение солнечной радиации при прохождении через разные среды (снег, лед, вода) как в видимом диапазоне в целом, так и по спектральному составу.
4. Оригинальный выбор измерительно-регистрирующей аппаратуры и архитектуры комплекса в целом позволил впервые получить комплексные данные о структуре пограничного слоя лёд - вода, толщине ламинарного и переходного слоев при разной заснеженности, объёмном поглощении проникающей солнечной радиации, подледной температуре и скорости течений на Байкале и в малом озере.
5. Разработана и всесторонне протестирована математическая модель теплообмена в системе вода-лед, имеющая вид задачи Стефана для системы нелинейных параболических уравнений теплопереноса.
6. Впервые для оценок тепловых потоков использованы разные методы расчета: по толщине льда и тепловому потоку во льду; по градиенту температуры в ламинарном слое; по течениям и турбулентному обмену в подледном слое воды; по решению обратной задачи модели динамики толщины ледового покрова. Сочетание различных методов расчета гарантирует высокое качество и надежность полученных оценок.
7. Установлено, что толщина подледного ламинарного слоя на Байкале значительно меньше, чем в малых озерах.

Разработанные в диссертации методики сбора и анализа данных и полученные с их помощью результаты имеют высокую **практическую значимость**:

1. Разработанное оборудование позволяет осуществлять комплексный дистанционный мониторинг динамики толщины льда и распределения температуры в системе вода-лед, что в сочетании развитыми в диссертации методами математической обработки дает возможность получения количественной оценки потоков тепла на границе фазового перехода.

2. Разработанные измерительные комплексы применяются при полевых исследованиях в ФГБУН Лимнологический институт СО РАН. Полученные экспериментальные данные использованы для верификации параметров модели нарастания ледового покрова озера.

3. Созданный при выполнении диссертационного исследования комплекс гибок и универсален, он может быть использован при проведении комплексных научных исследований различных ледовых объектов арктического региона.

Результаты диссертации **рекомендуются** к использованию и внедрению в научных и проектных организациях, занимающихся исследованием и комплексным мониторингом крупных водных ледовых объектов, а также разработкой техники и транспортных систем, работающих в арктических условиях: ИВП РАН, ИВЭП СО РАН, ЛИИ СО РАН, ИО РАН, ТОИ ДВО РАН, РГГМУ, ААНИИ, ЦНИИ им. ак. А.Н. Крылова. Упрощенный вариант комплекса может быть применён МЧС для мониторинга состояния ледовых переправ.

**Достоверность результатов** исследования не вызывает сомнений и подтверждается применением оригинальной измерительно-регистрающей аппаратуры, имеющей высокую разрешающую способность, проведением калибровок аппаратуры, большим объемом натурных данных, собранных в разнообразных метеорологических условиях и различных зонах озера Байкал, проведением сопоставлений с данными, полученными на малом озере, применением корректных методов обработки данных и математического моделирования, согласованностью результатов расчётов потоков тепла, полученных разными методами, как между собой, так и с опубликованными данными других исследователей.

#### **По содержанию диссертационной работы имеется несколько замечаний:**

1. К рисунку 44 дана не соответствующая действительности подрисовочная подпись «Распределение температуры в системе вода-лед в зависимости от расстояния от поверхности ледового покрова», в то время как на рисунке представлены временные ряды для скорости ветра и проходящей под лед радиации. Ошибка не мешает восприятию материала, т.к. в тексте диссертации содержится соответствующее действительности описание.
2. В работе приводится обсуждение явлений, связанных с возникновением сейшевых колебаний в озере, покрытом льдом. При этом отождествляются частоты сейшевых колебаний в озере, покрытом льдом, и свободном ото льда. Для больших водоемов данное допущение, разумеется, является верным, однако для строгости изложения можно было бы привести ссылки на соответствующие работы, в которых рассматриваются сейшевые колебания при наличии и отсутствии ледового покрова.
3. При проведении натурных исследований помимо научной и технической сторон вопроса важна также организационная составляющая. В частности, было бы уместно привести краткое описание решения вопроса об антивандальных мероприятиях, предпринятых для защиты измерительного комплекса.

#### **Заключение**

Диссертация Асламова И.А. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области комплексных натурных исследований массо- и теплообменных процессов на границе вода-лёд в крупных пресноводных водоемах. Диссертация органично сочетает решения сложных задач разработки методики, средств измерений и сбора данных, проведения комплексного мониторинга на натурных объектах,

математической обработки больших массивов данных, разработки и верификации математической модели изучаемого явления.

Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Основные результаты исследований опубликованы в 19 работах, включая 7 статей в журналах из списка ВАК. Работа прошла апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня и соответствует специальности 25.00.27 – «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия».

Диссертационная работа «Теплообмен на границе вода-лед и структура подледного слоя воды в озере Байкал» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Асламов Илья Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук специальности 25.00.27 – «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия».

Отзыв на диссертационную работу Асламова И.А. обсужден и одобрен на заседании научного семинара «Прикладная гидродинамика» федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН» 06.03.2019 г.

Заведующий лабораторией экспериментальной  
прикладной гидродинамики ИГиЛ СО РАН  
доктор физико-математических наук  
Евгений Валерьевич Ерمانюк

Руководитель семинара «Прикладная гидродинамика»  
главный научный сотрудник  
член-корреспондент РАН  
доктор физико-математических наук  
Владислав Васильевич Пухначев

630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15  
тел.: +7 (383) 330 12 41; +7(383)333 18 19  
e-mail: [ermanyuk@hydro.nsc.ru](mailto:ermanyuk@hydro.nsc.ru)  
[pukhnachev@gmail.com](mailto:pukhnachev@gmail.com)