

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию И.А. Асламова  
«Теплообмен на границе вода-лед и структура подледного слоя воды в озере Байкал»,  
представленную на соискание учёной  
степени кандидата физико-математических наук по специальности  
25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Диссертация И.А. Асламова посвящена исследованию процессов теплопереноса в системе вода-лёд и структуры подлёдного слоя воды в условиях глубокого пресного водоёма на примере озера Байкал. В последнее время отмечается рост научного интереса к исследованиям подледного периода на озерах в связи с реакцией средне- и высокоширотных водоемов на глобальное потепление. Исследование последствий этих фенологических изменений для водных ресурсов требуют количественной оценки физических механизмов, влияющих на формирование и таяние ледового покрова. Среди этих механизмов наименее изученным является тепло- и массообмен на границе вода-лед. Это связано с трудностями измерения потока тепла и его зависимости от целого ряда физических процессов, в том числе от поглощения солнечной радиации, изменчивости температуры внутри ледового покрова и в подледном слое воды, а также интенсивности течений и турбулентности в водной толще.

До настоящего времени количественное описание процесса нарастания толщины ледового покрова не обеспечено в достаточной мере данными измерений температуры в ледовом покрове и тонком подледном слое воды. Большой диапазон пространственно-временных масштабов, вкупе со сложностью условий сбора экспериментальных данных, делали невозможными до последнего времени их детальные полевые исследования. В связи с вышесказанным, возникла потребность в аппаратно-программном комплексе, позволяющем в режиме *insitu* в течение нескольких месяцев автономно выполнять непрерывный мониторинг вертикального распределения температуры в приледном воздухе, ледовой толще и подледном слое воды при одновременной регистрации поступающей и проходящей под слой снега и ледовый покров солнечной радиации, а также толщин снежного и ледового покровов.

Наиболее актуальными объектами для исследования подлёдного пограничного слоя в условиях реального водоема являются озера с длительным подледным периодом, относительно небольшим снежным покровом, обеспечивающим проникновение солнечной радиации сквозь лед, и горизонтальными масштабами, при которых генерируются значимые подледные течения. В этом смысле, озеро Байкал – идеальный объект, как с точки зрения его природной уникальности, так и с точки зрения разнообразия условий и



интенсивности физических процессов и их значения для функционирования озерной экосистемы. Автор провел также измерения, подобные проведенным на Байкале, на небольшом озере Килписъярви на севере Финляндии.

Исследование и моделирование процессов образования ледового покрова относятся к области рационального природопользования – приоритетного направления развития науки в РФ.

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов – общих и в каждой главе, списка использованных источников. Полный объем диссертации — 130 страниц, включая рисунки и таблицы.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель, задачи и основные защищаемые положения диссертации, охарактеризованы практическая значимость и научная новизна, приведен список работ по теме диссертационной работы, указан личный вклад автора и апробация результатов исследования.

Первая глава имеет обзорный характер. В ней приведен обзор методов измерения толщины льда и моделей количественного описания тепловых процессов, сопряженных с образованием и ростом толщины ледового покрова. Содержание главы показывает хорошее знакомство автора с литературой по теме диссертации, историей исследования физических механизмов теплообмена водоемов, покрытых льдом.

Во второй главе описано устройство разработанного автоматизированного аппаратно-программного комплекса для регистрации вертикального распределения температуры в воздухе, в толще льда, и подледном слое воды, поступающей и проходящей под слой снега и ледовый покров солнечной радиации, а также толщин снежного и ледового покровов. Измерительная система комплекса состоит из 30 температурных датчиков, трех датчиков освещенности, ультразвукового измерителя толщины снежного покрова. Выносная конструкция термодатчиков обеспечивает минимальное температурное влияние основного несущего кабеля на измеряемую ими температуру. Их миниатюрность позволяет получать профиль температуры с высоким разрешением по вертикали. В комплексе применен разработанный автором гидроакустический метод измерения толщины ледового покрова, работающий по принципу обратного эхолота. Предложенный акустический метод обладает высокой разрешающей способностью (0.05 мм). Автором создан уникальный приборный комплекс для исследования процессов теплообмена атмосферы с водоемом, покрытым льдом.

В третьей главе проводится анализ полученных с помощью разработанного комплекса данных о распределении температуры в системе воздух-лед-вода, толщине льда, приходящей и проходящей под лед солнечной радиации, а также скоростях подледных



течений. В результате серии экспериментов, проведенных в разные годы в разных районах озера (по степени заснеженности ледового покрова, интенсивности поступающей солнечной радиации и скоростям подледных течений), а также на разных водных объектах. Автором диссертации был накоплен огромный массив исходных данных для последующего анализа с помощью широкого спектра методов и подходов, включая математическое моделирование.

В четвертой главе описывается разработанная математическая модель изменения толщины ледового покрова. Модель использовалась в двух вариантах.

Прямое решение задачи Стефана с заданными коэффициентами применялось для оценки влияния температуры воздуха, солнечной радиации и теплообмена в толще льда и подледной воде (в том числе, скрытого и явного потоков тепла на границе вода-лед) на изменчивость температуры в системе вода-лед.

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. В результате решения обратной задачи нарастания ледового покрова на основе измеренных толщин льда, солнечной радиации и температур в системе лед-вода были рассчитаны коэффициенты эффективной теплопроводности в подледной воде и проведены оценки вертикального распределения потоков тепла в системе вода-лед. Результаты моделирования показали хорошее согласование измеренных и рассчитанных по модели температур в толще льда и подледной воде, а также динамики изменения толщины ледового покрова.

В пятой главе описывается структура пограничного слоя подледной воды и обсуждаются результаты экспериментов по измерению скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (ТКЭ). Прямые измерения скорости диссипации ТКЭ послужили основой для фундаментальных результатов: качественного доказательства наличия слоя постоянного турбулентного напряжения («логарифмического» слоя) подо льдом Байкала, оценки диапазона скоростей течений, при которых формируется логарифмический слой, и определения количественных характеристик пограничного слоя (параметра шероховатости нижней поверхности льда и соотношения между средним течением и интенсивностью перемешивания).

Наблюдения скоростей диссипации турбулентной энергии на малом арктическом озере выявили новые механизмы взаимодействия атмосферы и подледной массы воды. В частности, изменения в условиях весенней конвекции происходят на синоптических временных масштабах и связаны с ветровыми явлениями. Колебания ледового покрова,



вызванные ветром могут увеличивать энергетику перемешивания на порядок. По мере того, как лед утоньшается и усиливается стратификация в переходном слое, можно ожидать, что роль интенсифицируемого ветром перемешивания в конвективном слое значительно возрастет. Однако для получения количественных оценок роли перечисленных механизмов требуются дальнейшие натурные исследования и математическое моделирование.

В шестой главе описывается теплообмен на границе вода-лед. Оценки потоков для Байкала оказываются существенно выше полученных в малых озерах и изменяются почти на порядок в зависимости от скорости подледных течений. Данный результат демонстрирует значительное влияние подледных течений на формировании потока тепла на нижней границе льда, и, как следствие, толщины ледового покрова в крупных водоемах. Генерируемая течениями сдвиговая неустойчивость является, по сути, основным зимним механизмом переноса тепла из водной толщи к нижней поверхности льда, так как доля потока тепла за счет конвекции при повышении минерализации в период интенсивного нарастания ледового покрова на Байкале невелика, а интенсивность турбулентного обмена за счет объемного поглощения солнечной радиации становится значительной только к весне.

Илья Александрович Асламов провел многолетние уникальные экспедиционные работы, в ходе которых получены оригинальные данные, выполнил моделирование процесса теплообмена на границе вода-лед. Завершается работа выводами, по поводу которых есть замечания, приведенные далее.

Подводя итог, необходимо отметить, что диссертация И.А. Асламова представляет собой законченное научное исследование, выполненное на современном научном уровне. Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации и дает исчерпывающее представление как о самой работе, так и о полученных результатах.

Полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью и могут использоваться при решении ряда практических задач. Разработанный измерительный комплекс может быть использован научными группами и лабораториями для проведения натурных исследований, в настоящее время они применяются при полевых исследованиях в Лимнологическом институте СО РАН. В упрощенном варианте измерительный комплекс может быть применён МЧС и другими организациями для мониторинга состояния льда. Разработанное оборудование позволяет дистанционно получать экспериментальные данные о динамике толщины льда и распределении температуры в системе вода-лед, что позволяет рассчитывать потоки тепла на границе фазового перехода по предложенным методикам. Результаты работы могут быть использованы при исследованиях водных объектов арктического региона.



Научная обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждается применением оригинальной измерительно-регистрирующей аппаратуры с высокой разрешающей способностью, откалиброванной по поверенным приборам, большим объемом накопленного экспериментального материала, согласованностью результатов расчётов потоков тепла полученных разными методами, в том числе математическим моделированием, между собой и с опубликованными данными других исследователей.

По диссертации имеются замечания:

1. Измерители скорости течений работали не все время экспериментов, измерения не охватывали тонкий подледный слой, измерители скорости и термоксы были пространственно разнесены. Однако последствия этого для сравнения натуральных данных с результатами моделирования не обсуждаются в работе.

2. Автор исследовал кольцевые структуры ледового покрова Байкала и получил уникальные натурные данные, однако описание этого интересного явления очень кратко, поверхностно и не отражено в результатах и выводах.

3. Выводы по диссертации плохо структурированы, они содержат как результаты натуральных экспериментов и результаты моделирования, так и непосредственно выводы. Увлечшись объемностью, масштабностью проведенных исследований, автор утратил четкость при формулировке выводов работы. Вывод автора об определяющей роли сдвиговой неустойчивости течений в подледном переносе тепла требует дополнительных обоснований. Возникает вопрос о достоверности оценок скорости диссипации ТКЭ на глубинах около 20 см от нижней границе льда, приведенных в работе.

4. Можно указать на ряд неточностей, стилистических погрешностей в диссертации и автореферате. Например, на рис.35 не указана глубина, на которой измерялась скорость течения. Рис. 57 по легенде содержит А,Б,В, однако Б и В отсутствуют. К числу недостатков диссертации можно отнести и явный перебор в количестве иллюстраций (77!, многие из них двойные), которые не только иллюстрируют и доказывают, но и затрудняют восприятие.

5. В обзоре, к сожалению, автор не отразил роль профессора А.А. Сперанской в исследовании процессов льдообразования.

Указанные замечания не снижают теоретической и практической ценности диссертационной работы, достоверности и значимости основных результатов. Часть замечаний могут рассматриваться как пожелания автору в дальнейшей работе.

Работа автора значительно превосходит по ряду показателей, таких как фундаментальность, новизна, масштабность или объем хорошую кандидатскую диссертацию.

Диссертационная работа И.А. Асламова является законченным самостоятельным научным исследованием, имеющим научное и практическое значение, а ее автор Илья Александрович Асламов заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-



математических наук по специальности 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Основные результаты работы хорошо известны специалистам и опубликованы в журналах, сборниках, трудах конференций (всего 19 публикаций), из них 7 статей – в журналах из Перечня ВАК, 5 статей в журналах, индексируемых в базах данных WebofScience и Scopus. Без соавторов опубликовано 3 работы.

#### Официальный оппонент

заведующий кафедрой физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

д.ф.-м.н., профессор

Константин Васильевич Показеев

12 марта 2019 г.

---

#### Сведения о составителе отзыва:

Ф.И.О.: Показеев Константин Васильевич

Адрес: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.2, Физический факультет

Телефон: +7(495) 939-16-77

E-mail: sea@phys.msu.ru

Организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра физики моря и вод суши  
Должность: Заведующий кафедрой физики моря и вод суши, профессор.

Подпись доктора физико-математических наук, профессора

заведующего кафедрой физики моря и вод суши

Показеева Константина Васильевича

Заверяю

Декан физического факультета

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

профессор Н.Н. Сысоев

