

от «24» января 2019 г.

**Протокол № 4 /2019  
Заседания Диссертационного совета Д.002.040.01**

**при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институт водных проблем Российской академии наук**

Из 30 членов Диссертационного совета на заседании присутствовало 21 человек.

**Слушали:**

Доклад д.ф.-м.н. В.Н. Зырянова от лица комиссии Диссертационного совета о результатах рассмотрения диссертационной работы Асламова И.А. «Теплообмен на границе вода-лед и структура подледного слоя воды в озере Байкал».

**Постановили:**

- 1) Считать, что диссертационная работа соответствует профилю работы совета.
- 2) В соответствии с рекомендациями комиссии принять к защите диссертационную работу Асламова И.А. «Теплообмен на границе вода-лед и структура подледного слоя воды в озере Байкал» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия».

3) Утвердить оппонентами работы:

1. доктора физико-математических наук, профессора К.В. Показеева (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, зав. кафедрой физики моря и вод суши)
2. кандидата физико-математических наук Е.В. Степанову (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской Академии Наук (ИПМех РАН), ст.н.с. лаборатории геомеханики)

Ведущую организацию – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН)

Назначить защиту на «28» марта 2019 г. в 11 ч.

Ученый секретарь

д.ф.-м.н.

/М.А. Соколовский/

Председатель комиссии  
д.ф.-м.н., проф.

/В.Н. Зырянов/

## **Заключение**

по диссертации И.А. Асламова «Теплообмен на границе вода – лёд и структура подлёдного слоя воды в озере Байкал», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия»

На рассмотрение представлены следующие документы и материалы:

- том с текстом диссертации на 130 страницах
- автореферат диссертации на 24 страницах

### Актуальность темы

Диссертация И.А. Асламова посвящена малоизученным вопросам: теплообмена на границе вода-лед и исследованию тонкой структуры пограничного слоя воды. Сезонное формирование ледового покрова – неотъемлемая черта гидрологического режима озер и рек умеренного и субполярного климатических регионов. Замерзающие озерные системы содержат основную массу мировых запасов пресной воды. Их ледовый режим влияет на баланс осадков и испарения, а также экологическое состояние, трофический статус и, как следствие, качество воды самих озер. Исследуемая проблема, несомненно, актуальна, в связи с наблюдаемым в последние 100 лет сокращением ледового периода на озерах по всему миру. Оценка последствий этих фенологических изменений для водных ресурсов требует количественной оценки физических механизмов, влияющих на формирование и таяние ледового покрова. Среди этих механизмов наименее изученным остается тепло- и массообмен на границе вода-лед. 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. Изменчивость теплового потока на границе вода-лед в течение ледового сезона в озерах мало исследована. 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. Все перечисленные выше вопросы восполняются данным исследованием.

### Основные результаты

1. Для исследования вертикального теплообмена в системе вода-лед было разработано и изготовлено специализированное оборудование. Экспериментальные

данные позволили получить информацию о структуре пограничного слоя. Определена толщина вязкого ламинарного слоя подледной воды (1-5 мм). Положение границы переходного слоя к основной турбулентной водной массе изменяется в широких пределах (0.1-3 м от нижней кромки льда) и существенно зависит от скорости подледных течений.

2. Из численного решения обратной задачи Стефана были получены вертикальные распределения эффективной температуропроводности, значения которой на глубине 4 м достигают  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с. Впервые проведено сопоставление величины плотности потока тепла, полученного разными методами: по толщине льда и тепловому потоку во льду, по градиенту температуры в ламинарном слое, по скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (ТКЭ) и по решению обратной задачи модели динамики толщины ледового покрова. Значения, полученные разными методами, хорошо согласуются. Показано, что в разные годы и в различных районах озера плотность потока тепла из воды в лед варьируется в широких пределах (от 2 до 50 Вт/м<sup>2</sup>), обуславливаемая, главным образом, интенсивностью подледных течений и температурой подледной воды. Таким образом, поток тепла из воды в лед на Байкале может составлять от 5 до 100 и более процентов от величины потока тепла во льду, и пренебрежение им при моделировании динамики толщины ледового покрова может привести к существенным ошибкам.
3. В сравнении с оценками, полученными предыдущими исследователями для малых озер, на Байкале могут наблюдаться как сравнимые величины потока тепла из воды в лед, так и существенно большие, что согласуется с увеличенными на один-два порядка, в силу значительных подледных течений, величинами коэффициента эффективной температуропроводности, и, как следствие, меньшей толщиной вязкого ламинарного подслоя.
4. Прямые измерения скорости диссипации ТКЭ послужили основой для фундаментального результата: 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  $z_0$  и соотношения между средним течением и интенсивностью перемешивания).
5. Исходя из локального баланса между продукцией и диссипацией турбулентной энергии в пограничном слое, была установлена прямая зависимость между средней

скоростью течения и интенсивностью турбулентности подо льдом, что позволило протестировать и подтвердить гипотезу о пропорциональности потока тепла на границе вода-лед масштабу скорости Колмогорова. Показано, что поток тепла на границе вода-лед может быть достоверно восстановлен на основании температуры воды и скорости течений на определенном горизонте.

#### Научная новизна полученных автором результатов работы

- Разработан гидроакустический метод измерения толщины ледового покрова по принципу обратного эхолота. Высокая разрешающая способность метода (0.05 мм) обеспечивается за счет излучения в воду фазоманипулированного зондирующего импульса, применения цифровой обработки и корреляционного детектирования сигнала. Вертикальный профиль скорости звука рассчитывается по профилю температуры, полученному с косы термодатчиков.
- Применение современной микропроцессорной техники и миниатюрных аналогово-цифровых преобразователей позволило создать пространственно-распределенную косу адресуемых цифровых температурных датчиков, работающих по общей пятипроводной шине. Такой подход позволяет гибко расширять количество датчиков в косе. Разрешающая способность измерения температуры не хуже 0.002 °С.
- Применение в разработанном приборе нескольких датчиков освещенности, позволяет определять поглощение солнечной радиации при прохождении через разные среды не только в видимом диапазоне в целом, но и по спектральному составу излучения (красный, зеленый, синий, ИК)
- Применение оригинальной измерительно-регистрирующей аппаратуры и математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в рамках многослойной системы атмосфера-лёд-вода позволило впервые получить комплексные данные о структуре пограничного слоя лёд – вода, толщине ламинарного и переходного слоев при разной заснеженности, объёмном поглощении проникающей солнечной радиации, подлёдной температуре и скорости течений на Байкале.
- Впервые для оценок тепловых потоков были использованы разные методы расчета: по толщине льда и тепловому потоку во льду; по градиенту температуры в ламинарном слое; по течениям и турбулентному обмену в подлёдном слое воды; по решению обратной задачи модели динамики толщины ледового покрова.
- Установлено, что толщина подледного ламинарного слоя в оз. Байкал значительно меньше, чем в малых озерах.

#### Практическое значение работы

Разработанное в рамках диссертационной работы оборудование позволяет получать экспериментальные данные о тонкой динамике толщины льда и распределении температуры в системе вода-лед, что позволяет рассчитывать потоки тепла на границе вода-лед по предложенной методике. Разработанные измерительные комплексы используются в ЛИИ СО РАН. Полученные экспериментальные данные были применены для верификации параметров модели описания нарастания ледового покрова озера Байкал. Разработанный комплекс интересен в первую очередь для проведения натурных исследований научными группами и лабораториями. В упрощенном варианте может быть использован МЧС для мониторинга состояния ледовых переправ.

Результаты работы могут быть использованы при исследованиях водных объектов арктического региона.

#### Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных соискателем работах

По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 7 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, из них 5 в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

1. Асламов И.А. Универсальный программируемый модуль для сбора, обработки и хранения информации с локально-распределенных систем на базе 1-wire шины // Вестник ИрГТУ. – 2007. – Т.2. – С.74-76.
2. Асламов И.А., Козлов В.В., Мизандронцев И.Б., Кучер К.М., Макаров М.М., Горнов А.Ю., Гранин Н.Г. Автоматизация инженерно-гидрологических испытаний // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – №3. – С.132-139.
3. Aslamov I.A., Kozlov V.V., Kirillin G.B., Mizandrontsev I.B., Kucher K.M., Makarov M.M., Gornov A.Yu., Granin N.G. Ice-water heat exchange during ice growth in Lake Baikal // Journal of Great Lakes Research. – 2014. – V.40. – P.599-607.
4. Асламов И.А., Козлов В.В., Мизандронцев И.Б., Кучер К.М., Гранин Н.Г. Оценка потока тепла на границе вода-лед на Байкале по экспериментальным данным // ДАН. – 2014. – Т.457. – С.477-480.
5. Асламов И.А., Козлов В.В., Кириллин Г.Б., Мизандронцев И.Б., Кучер К.М., Макаров М.М., Гранин Н.Г. Исследование теплового потока и структуры подледного слоя воды на границе со льдом в Южном Байкале // Водные ресурсы. – 2017. – Т.44. – С.296-310.
6. Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Козлов В.В., Цветова Е.А., Гнатовский Р.Ю., Блинов В.В., Асламов И.А., Кучер К.М., Иванов В.Г., Жданов А.А. Кольцевые структуры на ледовом покрове озера Байкал: анализ экспериментальных данных и математическое моделирование // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 11. – С. 1890-1903. DOI:

10.1016/j.rgg.2018.10.011

7. Kirillin G., Aslamov I.A., Leppäranta M., Lindgren E. Turbulent mixing and heat fluxes under lake ice: the role of seiche oscillations // Hydrology and Earth System Sciences. – 2018. – V. 22. – № 12. – P. 6493–6504. DOI: 10.5194/hess-22-6493-2018

Публикации автора представляют интерес для специалистов, моделирующих нарастание ледового покрова. В представленных работах изложен почти весь материал, полученный в рамках диссертационного исследования.

#### Выводы

Комиссия, рассмотревшая диссертационную работу И.А. Асламова, считает, что она может быть представлена на защиту в Диссертационный совет Д.002.040.01 на базе Института водных проблем РАН, поскольку отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям по специальности 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия», посвящена актуальной теме, содержит научно значимые результаты, имеет очевидную практическую применимость. Работа выполнена диссертантом самостоятельно.

Высказанные при обсуждении замечания рекомендуется учесть в автореферате и при подготовке доклада к защите.

#### Члены комиссии:

д.ф.-м.н.



В.А. Вавилин

д.ф.-м.н.



В.Н. Зырянов

д.ф.-м.н.



М.А. Соколовский