

Отзыв

на диссертацию Асламова И.А.

«ТЕПЛООБМЕН НА ГРАНИЦЕ ВОДА – ЛЁД И СТРУКТУРА ПОДЛЁДНОГО СЛОЯ ВОДЫ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

В работе представлено комплексное исследование теплообмена на границе вода – лед и сопряженных с ним задач расчета динамики ледяного покрова и структуры подледного слоя воды. Тема весьма актуальна как в контексте фундаментальных проблем турбулентности, так и в связи с изучением термического баланса озер.

Во введении и в первой главе представлен анализ литературы и методов, используемых при исследовании теплообмена в подледный период, достаточно полно сформулирована современная проблематика этого домена исследований, который до сих пор остается одним из наименее изученных. Представленные в последующих главах результаты лабораторных, полевых, теоретических исследований автора убедительно свидетельствуют о существенном новом вкладе в решение этих проблем. Особенно следует отметить разработку и апробацию оригинального автономного ледового комплекса, позволяющего получить уникальные (по временной и пространственной разрешенности) данные по динамике полей температуры и скорости и динамике ледяного покрова. При этом, в частности, представлена оригинальная методика построения подробного (включая ламинарный подслой) профиля температуры, основанная на конвертации данных о зависимости температуры от времени в ряды, позволяющие оценить зависимость температуры от расстояния до нижней подвижной границы льда.

Достаточно убедительно представлена и математическая модель изменения толщины ледового покрова, как в отношении постановки прямой и обратной задачи Стефана, так и в плане ее численного решения. Значительный интерес представляют результаты пятой главы, посвященной изучению структуры пограничного слоя подледной воды и скорости диссипации турбулентной кинетической энергии, а также проведенные в шестой главе оценки потока тепла на границе вода-лед, выполненные четырьмя независимыми методами. Впервые также получена достоверная количественная оценка гладкости озерного льда.

Проведен сравнительный анализ динамики ледяного покрова и потоков тепла из воды в лед для озера Байкал и малых бореальных озер. Показано, что существенные (на один-два порядка) отличия соответствующих параметров можно объяснить присутствием на Байкале значительных подледных течений и, соответственно, увеличением эффективного коэффициента температуропроводности.

В то же время по работе имеется ряд замечаний.

1. На Рис. 60 приведена рассчитанная зависимость скорости диссипации ε от глубины, начиная с расстояний в несколько сантиметров ото льда. Однако справедливость оценок ε для столь малых глубин весьма спорна: протяженность инерционного интервала достигала 0,4 м, и, поскольку это значение можно рассматривать как пороговое для выполнения условия локальной однородности, оценки на меньших по значению глубинах весьма условны. Кроме того, в пограничном слое турбулентность анизотропна, и оценки ε , выполненные по продольной корреляционной функции, могут приводить к значительным погрешностям.

2. Возникают вопросы к приведенным в главе 5 «прямым количественным оценкам интенсивности перемешивания» и, соответственно, к строгости определяемых понятий. Указанные оценки в основном увязаны с параметром ε , однако в строгой постановке «эффективность перемешивания» (*mixing efficiency*) определяется по скорости диссипации ε_p потенциальной энергии.

3. Вывод автора об определяющей роли сдвиговой неустойчивости в зимнем переносе тепла представлялся бы более убедительным, если бы в работе были представлены количественные оценки таких важнейших параметров, как Ri и Re_b , с последующим расчетом коэффициента турбулентной диффузии на основе соотношения Осборна. Следует также иметь в виду, что в некоторых новейших публикациях (см., например, Yang, B., Young, J., Brown, L., & Wells, M. (2017). High-frequency observations of temperature and dissolved oxygen reveal under-ice convection in a large lake. *Geophysical Research Letters*, 44, 12,218–12,226. <https://doi.org/10.1002/2017GL075373>) представлены альтернативные выводы о механизмах зимнего теплообмена в крупных озерах, так что вопрос о значимости различных механизмов (включая радиационную конвекцию) генерации турбулентности и передачи тепла все же открыт.

4. Оценки потока тепла, выполненные на основе использования Колмогоровских диссипативных масштабов, несколько эклектичны. Остается неясным, в частности, содержание основной гипотезы: пропорционален ли поток Колмогоровской скорости или обратно пропорционален диссипативному масштабу? Не лишними в данном разделе были бы оценки и других определяющих масштабов: Озмидова $L_O = (\varepsilon/N^3)^{1/2}$ и Болджиано $L_B = \varepsilon^{5/4} \varepsilon_g (\beta g)^{-3/2}$

5. Из текста на с. 72 не совсем ясно, как аппроксимировалась зависимость эффективной температуропроводности воды от z при решении прямой задачи Стефана? Приведены лишь значения a_{ef} для трех горизонтов.

Работа хорошо структурирована, основные положения четко сформулированы, для текста характерен ясный стиль. В то же время в

материале есть опечатки и неточности, которые в ряде случаев искажают смысл:

С. 55. ... Динамика изменения толщины ледового покрова $\xi(t)$, рассчитанная по модели (1) - (7) для станций 1 и 2...

С. 58. ...средний вертикальный *градиент* в верхних 10 метрах составлял $0.6^\circ\text{C} \dots ? \dots$

С. 93. ...Исходя из пропорциональности $2/3$ верхняя граница инерционного интервала достигала 0.1-0.4 м, в то время как меньшие значения соответствовали более сильным флуктуациям (рис. 59). ...

С. 94. ...Как и скорости диссипации ТКЭ, профили средних скоростей течений имеют логарифмический характер. ...

С. 67. На Рис. 44 подпись не соответствует содержанию.

В целом работа выполнена на высоком профессиональном уровне, содержит новые интересные результаты и представляет несомненный интерес для лимнологического сообщества. Приведенные замечания не умаляют ее значимости и во многом могут рассматриваться как пожелания по планированию и продолжению будущих исследований по представленной теме. Считаю, что диссертация И.А.Асламова соответствует требованиям ВАКа, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Богданов Сергей Рэмович, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН (Россия, Республика Карелия, 185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), доктор физико-математических наук (специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» и 01.04.02 – «Теоретическая физика»), Sergey.R.Bogdanov@mail.ru, +79052998000.

05.03.2019



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Главный документовед

Н.Ю. Григорьевская
Н.Ю. Григорьевская

05 03 2019 г.