

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института  
вычислительной математики и  
математической геофизики СО РАН.

Академик РАН Б.Г. Михайленко

«28» апреля 2014 г.



### Отзыв ведущей организации

на диссертацию Цыденова Баира Олеговича «Численное моделирование эффекта весеннего термобара в глубоком озере», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Целью диссертации Цыденова Б.О. является исследование важного природного явления - термобара в глубоких озерах с помощью методов математического моделирования.

Актуальность работы несомненна, так как математическое моделирование в настоящее время становится основным средством изучения сложных процессов и явлений в водных объектах. С помощью выполнения сценарных расчетов появляется возможность оценить роль различных факторов и тем самым расширить понимание сути физических процессов.

Апробация работы. Автор выступал с докладами на Международных, Всероссийских и региональных конференциях. Четыре доклада на молодежных конференциях были отмечены экспертами Оргкомитетов.

Диссертационная работа подробно обсуждалась на семинаре научного совета по физике атмосферы, океана и охраны окружающей среды ИВМиМГ СО РАН.

#### Основные научные результаты, полученные автором, и их новизна

Во введении кратко сформулированы актуальность, цели, задачи, методы исследования, научная новизна и значимость работы.

В первой главе подробно описано в историческом аспекте состояние исследований по термобару, в том числе по методам математического моделирования этого явления, с перечислением основных результатов и воспроизведением большого количества рисунков из цитируемых работ. В выводах первой главы сформулированы требования, которым, по мнению автора, должна удовлетворять современная математическая модель исследуемого явления.

Во второй главе представлена комплексная модель, в состав которой входят негидростатическая модель динамики и термики изучаемого явления и модель распространения пассивной примеси в водоеме. В модели динамики учитываются: влияние силы Кориолиса, баланс тепла на поверхности и поглощение тепла в верхних слоях озера, нелинейная зависимость плотности от давления, солёности и температуры. Параметризация подсеточных масштабов проведена с использованием  $k-\omega$  модели Уилкокса. В качестве уравнения состояния используется известное уравнение Чена-Миллера. Баланс тепла на поверхности рассчитывается по набору известных из

литературы формул. Следует заметить, что модель сформулирована в квазидвухмерном варианте, в ней исключена динамика процессов по одному из горизонтальных направлений.

**В третьей главе** описан метод решения задачи и способ дискретизации уравнений с помощью метода конечных объемов. Выписано несколько способов аппроксимации конвективных членов с помощью известных схем. В п.3.6 приведено описание предложенного автором алгоритма SIMPLD, который является модификацией широко известного алгоритма SIMPLE Патанкара и Сполдинга. Суть модификации состоит в учете влияния плотности в уравнении для поправки давления. Для решения систем линейных алгебраических уравнений, получившихся в результате аппроксимаций, автор использует метод неполной факторизации Н.И. Булеева. В этой же главе приведены примеры тестовых расчетов для моделирования конвективных процессов в квадратной каверне и каверне с наклонным дном. Автор сравнил свои результаты с результатами расчетов других авторов, в том числе по пакету Fluent, и пришел к выводу, что между ними имеется качественное и количественное согласие.

**Глава 4** посвящена применению разработанной численной модели к изучению термобара на озере Камлупс. Автор повторил численные эксперименты Холланда и др., которые ранее получили «достаточно реалистичную картину развития термобара в озере Камлупс, которая согласуется с натурными наблюдениями Кармака и др». Результаты сравнения показали как качественное согласие, так и некоторые различия, которые автор относит за счет использования им другой модели турбулентной диффузии и другого метода решения. В п.4.4 автор представил результаты сценарных расчетов по воспроизведению различных вариантов развития термобара в зависимости от соотношений между температурами втекающей реки и самого озера. По утверждению автора результаты расчетов «полностью соответствуют описаниям натуральных наблюдений Кармака и др. в озере Камлупс.

**Пятая глава** посвящена результатам моделирования термобара в озере Байкал. Для первого сценария по моделированию течений в окрестности мыса Лиственичного автор использовал модель без учета сил Кориолиса и с уравнением состояния, использующим квадратичную зависимость отклонения температуры от фиксированного значения температуры максимальной плотности при атмосферном давлении. Эксперимент поставлен для замкнутой области 10 км\*900м с левой границей, представляющей наклон рельефа в окрестности м. Лиственичного.

Второй пример относится к другому району озера – Селенгинскому мелководью. Максимальная глубина – 300 м. В этом случае была использована комплексная модель, в которой для расчета баланса тепла на поверхности участвовали также реальные данные об атмосфере. Была выполнена серия численных экспериментов по оценке влияния различных факторов на параметры термобара. В последнем параграфе этой главы представлен расчет по распространению трассера на фоне гидродинамических процессов.

### Замечания

1. Основной вопрос возникает о том, насколько современна и представительна квазидвухмерная модель для воспроизведения реальных процессов в сложных природных объектах?
2. Нигде четко не написано, где находится начало координат по вертикали и это трудно понять из текста. На разных картинках нарисовано по-разному ( см. рис. 5.1 и 5.5), а в тексте написано: «на дне и на поверхности» без указания отметок глубин.
3. Вопрос о краевых условиях для  $\omega$ . На поверхности ( при  $z = H$  или  $0?$ ) и на дне

при  $z = 0$  или  $-H$ ? они имеют одинаковый вид: в знаменателе стоит  $(z + z_0)^2$ , только уровень шероховатости разный. Насколько значим этот уровень шероховатости для Байкальских глубин? А что если вертикальная координата будет расти в другую сторону? В этой связи возникает вопрос о выводах по влиянию  $k-\omega$  модели с такими условиями на воспроизведение процессов в озере Камплус.

4. В литературе есть достаточное количество модификаций метода SIMPLE для течений с плавучестью, то есть, в принципе, идея, использованная автором в SIMPLLED, не нова. В частности, распространена модификация SIMPLE, где плавучесть учтена через температуру. Здесь стоило бы сравнить новую модификацию с другими и привести условия её сходимости и устойчивости в практической реализации. Осталось непонятным, на каком основании автор утверждает, что его алгоритм позволяет увеличить шаг по времени в два раза? Какие критерии сходимости проверяются, каковы количественные оценки, сколько итераций требуется, с какой точностью проводятся расчеты? Об этом в тексте не упоминается.
5. Судя по формуле (3.26) в дискретном аналоге уравнения для поправки давления нет строгого диагонального преобладания, поэтому возникает вопрос о сходимости итераций для метода Булеева и устойчивости в целом SIMPLLED.

#### **Степень обоснованности научных положений и выводов.**

Автор построил свою версию нестационарной квазидвухмерной математической модели в негидростатическом варианте, которая опирается на известные в литературе постановки задач и методы реализации. Программные коды реализации проверены на тестовых примерах. Результаты сценарных расчетов согласуются с результатами других авторов. Поэтому можно считать полученные результаты обоснованными.

#### **Научная значимость полученных автором результатов.**

Суммируя изложенное, считаем, что автор сделал значительный шаг в разработке комплексной квазидвухмерной модели, которая позволяет осуществлять численное моделирование для исследования термобара глубоких озер.

В диссертационной работе имеются следующие элементы новизны: модель является комплексной; в ней используется модель турбулентности Уилкокса; предложен алгоритм решения задачи в целом; разработана процедура согласования полей скоростей и давления с учетом плотности; учитывается баланс тепла на поверхности водоема с использованием реальных данных, выполнены численные эксперименты для озер Камплус и Байкал.

#### **Соответствие специальности.**

Содержание диссертации соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», поскольку в ней представлены гидродинамические модели природных процессов (п. 19 паспорта специальности).

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Результаты исследований могут быть использованы при дальнейшем развитии исследований, построении более совершенных моделей, а также при планировании наблюдательных экспериментов по исследованию водоемов. Результаты могут быть использованы в учебном процессе при подготовке специалистов по гидромеханике и применению методов математического моделирования при решении природоохранных задач.

**Подтверждение опубликования основных результатов диссертации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в 23 публикациях, 3 из которых в журналах, рекомендованных ВАК.

**Общие выводы**

Уровень диссертации соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ, а ее автор, **Цыденов Баир Олегович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании Научного совета по физике атмосферы, океана и охраны окружающей среды Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук 24 апреля 2014 (протокол №5).

Заведующий лабораторией  
математического моделирования  
гидротермодинамических процессов  
в природной среде ИВМиМГ СО РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор



В.В. Пененко

Заведующий лабораторией  
математического моделирования процессов  
в атмосфере и гидросфере ИВМиМГ СО РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор



В.И. Кузин