

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию  
Подрезовой Надежды Алексеевны на тему  
«Моделирование морских плотностных потоков с учетом  
влияния придонного пампинга»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
25.00.28-океанология

Содержанием работы Н.А. Подрезовой является исследование с помощью физико-математической модели особенностей распространения придонных вод повышенной плотности. Теория процессов такого рода сложна и основным инструментом исследования является численный аппарат. Поэтому разработка методов, их апробация и верификация являются важной современной задачей.

Актуальность таких исследований имеет постоянный характер, определяемый сложностью процессов происходящих в результате формирования тяжелых донных вод. Одним из важных процессов в данном случае является дивергенция придонных экмановских потоков. Такие потоки генерируют течения в вертикальном направлении, а они, в свою очередь, запускают процессы приспособления окружающей среды, которые также влияют на распространение и форму плотностных вод. Объектом исследования является, распространяющаяся в виде придонного плотностного потока в глубоководной части Белого моря, баренцевоморская вода. На предварительном этапе, на основе данных натурных наблюдений, лабораторных измерениях, численных экспериментов различных авторов, проводилась верификация выбранной

Alfred Wegener Institute  
Helmholtz Centre for  
Polar and Marine Research  
**BREMERHAVEN**

Am Handelshafen 12  
27570 Bremerhaven  
Germany  
Phone +49 471 4831-0  
Fax +49 471 4831-1149  
www.awi.de

Public law institution

Head Office:  
Am Handelshafen 12  
27570 Bremerhaven  
Germany  
Phone +49 471 4831-0  
Fax +49 471 4831-1149  
www.awi.de

Board of Governors:  
MinDir Dr Karl Eugen Huthmacher  
Board of Directors:  
Professor Karin Lochte  
(Director)  
Dr Karsten Wurr  
(Administrative Director)  
Dr Uwe Nixdorf  
(Vice-Director)  
Professor Karen H. Wiltshire  
(Vice-Director)

Bank account:  
Commerzbank AG,  
Bremerhaven  
BIC/Swift COBADEFF292  
IBAN DE12292400240349192500  
Tax-Id-No. DE 114707273

численной модели. Проверялась оценка допустимости использования гидростатического подхода в описании движения плотностных вод.

Представленная работа состоит из введения, пяти частей и заключения. В первой главе представлен обзор факторов влияющих на формирование вод повышенной плотности. Рассмотрены механизмы формирования донных вод в различных областях Мирового океана. Приводится обзор результатов лабораторного и математического моделирования придонных плотностных процессов. Представлены математические модели использующие гидростатический или негидростатический подход описания движения плотностной линзы. Автором сделан обзор применимости того или иного подхода при моделировании плотностного потока.

Вторая глава посвящена анализу допустимости использования гидростатического приближения при моделировании плотностных потоков. Автор работы, опираясь на экспериментальные данные и модельные расчеты, утверждает, что движение плотностного потока происходит в основном вдоль изобат и в этом случае допустимо рассмотрение только горизонтальных сил, а вертикальной силой тяжести можно пренебречь. Оценки допустимости использования гидростатического подхода в этом случае автор определяет как отношение горизонтального градиента давления, рассчитанного в гидростатической и негидростатической постановках. Автором показано, что в рамках негидростатической модели градиент возмущения давления в области придонного плотностного потока определяется его составляющей по нормали к донной поверхности, а ее величина равняется приращению силы тяжести. Горизонтальная составляющая градиента возмущения давления в области придонного потока практически компенсируется горизонтальным градиентом давления, полученным в гидростатическом приближении. В связи с этим автор работы делает заключение о допустимости

использования гидростатического приближения в случае расчета плотностных течений.

Исходя из выводов предыдущей главы, автор в третьей главе рассматривает модель придонного плотностного потока в гидростатическом приближении. Аппроксимация области выполняется переходом к декартовым координатам с безразмерным вертикальным преобразованием. Адвективные слагаемые в уравнении движения не учитываются с целью упрощения системы. Нельзя не отметить, что данное упрощение может быть допустимо на гладком дне в однородном потоке и может быть недопустимо на реальном рельефе.

Рассматриваются уравнения для составляющих придонных вертикальных скоростей течений, обусловленных дивергенцией придонных экмановских потоков. Приводится метод решения плотностного потока и процессов связанных с реакцией окружающей среды на движение донных тяжелых вод.

В четвертой главе рассмотрены тестовые задачи распространения плотностного потока в областях различной конфигурации. Верификация модели происходит по анализу средней скорости перемещения потока со скоростью потока полученной из соотношения Нофа, связывающего редуцированное ускорение свободного падения, уклон дна и параметр Кориолиса. Результаты расчета показывают, что движение происходит практически вдоль изобат с небольшим смещением в направлении наклона дна. Показана роль реакции окружающей среды на распространение плотностной линзы. Изучены пространственных характеристики потока тяжелой воды при различных условиях.

Особенности распространения придонного плотностного потока на реальном объекте (Белое море) рассмотрено в пятой главе. Представлены основные особенности распространения и трансформации баренцевоморских вод в глубоководной части Белого моря.

В ходе работы с диссертацией у рецензента возник ряд вопросов и замечаний по тексту:

1) Одной из важных составляющих моделирования процессов распространения придонных плотностных вод является параметризация трения на дне. Автор использовал для параметризации касательного напряжения трения у дна соотношение Акерблома. Данная параметризация была получена Акербломом в 1908 году и применялась им для параметризации трения между нижней границей атмосферы с поверхностью земли. Насколько правильно применение данной параметризации для распространения плотностных вод у автора диссертации отсутствует.

2) Не менее важной компонентой моделирования вертикальных процессов в океане является проблема турбулентного замыкания. В работе отсутствует упоминание о численной модели для получения коэффициента турбулентной вязкости. А ведь без турбулентного замыкания система решаемых уравнений не является замкнутой.

3) Выбор коэффициента горизонтальной диффузии также остался за рамками работы. Если этот коэффициент выбирался константой, то необходимо было обосновать данный выбор.

4) Выбор численной схемы, использованной в работе, широко применяется в моделировании прибрежных процессов, с целью более простой реализации схемы осушки/затопления. В связи с отсутствием данных процессов в модели выбор численной схемы вызывает ряд вопросов в связи с ее более сложной реализацией по сравнению с одношаговой схемой. Численная реализация данной схемы требует дополнительной аккуратности в

согласовании трехмерной и двумерной задач. Такое согласование сводится не только к расчету дополнительных уравнений для пульсации скорости и их учете в осредненных по вертикали уравнениях для скорости, но и в гибкой параметризации донного трения в осредненных уравнениях движения. В данной постановке использование осредненных по вертикали скоростей для параметризации донного трения не допустимо. Наиболее сложным моментом является учет транспортных скоростей в трассерном уравнении, которые для центрирования схемы должны выбираться в середине шага по времени бароклинной задачи. В описании численной схемы данное согласование отсутствует и трехмерная и двумерные задачи рассматриваются отдельно.

5) Постановка условий на открытой границе при расчете тестового эксперимента и расчета плотностного потока в Белом море требуют некоторого пояснения. Приведенное условие (стр. 87) отражает связь скорости (осредненной по вертикали) и уровня. Такое граничное условие может быть применено только для средней задачи (осредненной по вертикали) при условии, что известна одна из переменных и достаточно слабо меняющемся донном рельефе. Каковы реальные граничные условия для трехмерной задачи?

6) Что автор подразумевает под использованием специальной криволинейной системы описания придонного плотностного потока в главе 3?. И почему численная схема приводится для иной вертикальной координаты, отличной от постановки задачи?

7) Автор работы при моделировании плотностного потока в Белом море говорит об отсутствии информации о пути распространения придонной воды и ее

взаимодействии с окружающей средой. На самом деле это не так. В последние годы появилось достаточное количество число работ по изучению данного объекта, как в зарубежной литературе так и отечественных авторов. Упомяну лишь несколько работ — Oziel et al, 2016 in Ocean Sci., 12, p.169-184; Arthum et al, 2012, J. Climate, 25, p. 4736-4743; Bashmachnikov et al, 2005, White Sea hydrodynamics and marine ecosystem, Springer. На сайте NOAA собрана большая база данных измерений за период 1957-1995 годов для данного региона. Современные вычислительные машины позволяют решать глобальные задачи на сетках высокого разрешения, так глобальная модель FESOM имеет разрешение в Белом море 4 км и достаточно правдоподобно описывает затекание баренцевоморских вод и формирование структуры вод Белого моря в сезонном цикле.

Как и любая работа большого объема данная диссертация содержит ряд опечаток и неточностей. Отмечу несколько из них. Во введении ссылки на работы приведены через фамилии авторов. Формула (1.3) в члене параметра Кориолиса одна компонента скорости вместо другой. В главе 3 в уравнениях 3.4 и 3.8 в левой части третий и пятый члены имеют размерность отличную от остальных. В разделе 3.4.3. приводится ссылка на уравнения (2.45)-(2.46), которые отсутствуют в работе. Также отсутствует рисунок 3.31, на который есть ссылка в разделе 4.1.3. Обозначение переменных, например для уровня, различно (формулы 3.1 и 3.5).

Хотелось бы обратить внимание автора на оформление рисунков. Визуализация результатов работы является неотъемлемой и не менее важной ее частью чем содержание. Черно-белые графика для современной

работы выглядит несколько устаревшей и трудно воспринимаемой. Также ни на одном из них нет подписи к осям, что опять затрудняет восприятие результатов моделирования. Рисунок 5.2 вызывает дополнительный вопрос. Протяженность Белого моря в самом его широком месте (Google Earth) оценивается порядка 430 км, а в работе протяженность бассейна почти в 4 раза меньше (если по осям отложены км). Чем это объясняется?

Оформление списка литературы требует также определенной стандартизации. В части работ год публикации указан после авторов, в других - на произвольном месте. В некоторых работах отсутствует полная выходная информация. Часть названия статей содержит ошибки, например, работа под номером 88, ее автор Denbo, а название: "An ocean.... aplication **to deep convection** in the...". Работа под номером 148 имеет оригинальное название: "Too cold. Bottom layers...".

Указанные недостатки не снижают общую ценность выполненной работы.

Автор провел большой объем теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых представляют научный и практический интерес. Принятые автором предложения и упрощения специально оговариваются, полученные результаты проверяются на экспериментальном материале. Численные эксперименты представлены подробным описанием их проведения и иллюстрированы. Изложение материала последовательно. Результаты диссертации, после некоторой доработки модели и расширения приложений, могут стать основой для дальнейшей научной работы автора.



В опубликованных автором статьях изложены основные результаты работы.

Диссертация Надежды Алексеевны Подрезовой на тему «Моделирование морских плотностных потоков с учетом влияния придонного пампинга» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Подрезова Надежда Алексеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.28-океанология.

Член диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук,  
научный сотрудник

Андросов Алексей Анатольевич



13.06.2017