

ОТЗЫВ

**официального оппонента главного научного сотрудника МГУ имени
М.В. Ломоносова, доктора физико-математических наук, доцента
Дианского Николая Ардальяновича
на диссертационную работу Воротникова Дмитрия Игоревича
на тему: «Процессы переноса, обусловленные инерционно-
гравитационными внутренними волнами»
по специальности 1.6.17. Океанология**

Диссертационная работа Д. И. Воротникова «Процессы переноса, обусловленные инерционно-гравитационными внутренними волнами» посвящена важной проблеме – исследованию процессов переноса, обусловленных инерционно-гравитационными внутренними волнами, в частности, оценке вкладов в вертикальный перенос гидрофизических полей. В своем исследовании автор учитывает вклады в вертикальный перенос не только за счет отличных от нуля волновых потоков, но и вклады стокова дрейфа (если таковые есть для той или иной гидрофизической величины) и проводит оценку турбулентных потоков.

Актуальность выбранной автором тематики подкрепляется фактом растущего внимания к процессам, обусловленным внутренними волнами и их влияния на хозяйственную деятельность человека, а также на различные природные процессы, такие как перераспределение биологически активных веществ, взвесей и примесей (в том числе антропогенного характера). Исследования внутренних волн имеет особую значимость в последние десятилетия и заняло важное место в современной гидрофизике океана. Это связано прежде всего с тем, что внутренние волновые движения стратифицированной жидкости в Мировом океане присутствуют повсеместно. Внутренние волны характеризуются широким диапазоном масштабов с длинами волн от десятков и сотен метров до десятков километров. Длинные волны имеют почти гармонический характер, короткие волны нередко распространяются в виде волновых пакетов, однако и короткие волны могут встречаться в виде модулированных

квазигармонических колебаний. Внутренние волны, таким образом, могут иметь перемежаемый характер. В тесной связи с нелинейной динамикой пакета находится порождение им средних на временном масштабе волны течений и возмущений плотности, которые обусловлены нелинейностью. В работе рассматриваются свободные внутренние волны без учета турбулентной вязкости и диффузии, в присутствии двумерного течения с вертикальным сдвигом скорости и при учете вращения Земли. В ней рассматривается непосредственный вклад (без учета генерации мелкомасштабной турбулентности) и влияние самих внутренних волн на вертикальный обмен, посредством рассмотрения вертикальных потоков тепла, соли, массы и импульса. Автор использует теорию возмущений для решения краевой задачи для внутренних волн в совокупности с численной схемой Адамса-Мультона третьего порядка точности и метода пристрелки для нахождения волнового числа.

К **научной новизне** диссертационной можно отнести то, что в ней впервые найдены вертикальные волновые потоки тепла, соли, импульса и массы, обусловленные внутренними инерционно-гравитационными волнами при наличии двумерного вертикально-неоднородного течения. Эти потоки обусловлены сдвигом фаз между колебаниями вертикальной скорости и колебаниями термо-гидродинамических полей, отличным от $\pi/2$. Рассчитан вклад в волновой перенос вертикальной составляющей скорости дрейфа Стокса, которая отлична от нуля в условиях данной задачи. Показано, что на шельфе определяющий вклад в волновой поток даёт вертикальная составляющая скорости дрейфа Стокса. Указанные потоки могут быть сравнимы или даже превосходить турбулентные потоки на шельфе.

Структура работы представлена в виде введения, обзора литературы, четырех взаимосвязанных и дополняющих друг друга глав, заключения и списка используемых источников и литературы, всего 107 стр.

Во **введении** приводится обоснование выбранной темы, описывается её актуальность, цели и задачи работы, научная новизна, практическая

значимость, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту. Приводится список конференций, на которых была апробирована работа. Все заключения и выводы, сделанные в работе, подкрепляются ссылками на соответствующие статьи автора в рецензируемых журналах.

В обзор литературы вынесено ретроспективное описание предшествующего научного опыта и накопленного знания об исследуемой автором проблематике.

В первой главе ставится физическая и математическая задачи и составляется соответствующий анзац решения. В линейном приближении и приближении Буссинеска была составлена краевая задача для амплитуды вертикальной скорости. Полученное дифференциальное уравнение второго порядка имеет комплексные коэффициенты, а значит частота и решение представляются в комплексном виде. При этом, можно заметить, что в

коэффициентах обезразмеренного уравнения содержится отношение $\varepsilon = \frac{V_{0*}}{H\omega_*}$, которое можно рассматривать как малый параметр, где использованы обозначения: V_{0*} – характерное значение компоненты скорости течения поперечной к направлению распространения волны, ω_* – характерная частота волны и H – глубина рассматриваемого участка. В дальнейшем решение краевой задачи и частота представляются в виде разложения в ряд по этому параметру. Таким образом краевая задача может быть решена с применением теории возмущений, где в нулевом порядке рассчитывается собственная функция вертикальной структуры внутренних волн и строятся дисперсионные кривые для первых двух мод. Эту задачу Д. И. Воротников решает численно при помощи неявной схемы Адамса третьего порядка точности с использованием натуральных данных для частоты Брента-Вяйсяля и скорости среднего течения. Волновое число подбиралось с помощью метода пристрелки для фиксированной частоты волны. В первом порядке по ε краевая задача становится неоднородной, и её решение строится путем

приведения дифференциального уравнения второго порядка к самосопряженному виду. Далее, из условия разрешимости краевой задачи, вычисляется комплексная поправка к частоте волны. Здесь же получены вертикальные волновые потоки импульса, которые впоследствии сравниваются с турбулентными. Показано, что волновой поток импульса продольной компоненты скорости \overline{uw} ненулевой только с учетом вращения Земли и сдвигового течения с поперечной к направлению распространения волны компонентой скорости, зависящей от вертикальной координаты. В этих условиях поперечная к направлению распространения волны компонента скорости стокова дрейфа также ненулевая, и по абсолютному значению уступает продольной на порядок. Волновой поток импульса для поперечной компоненты скорости \overline{vw} отличен от нуля даже без учета течения, но в присутствии вращения Земли, в таком случае он становится на два порядка меньше. Таким образом, автором было показано, что волновые потоки импульса могут быть ненулевыми в модели для внутренних волн без турбулентной вязкости и диффузии, но с учетом вращения Земли и при наличии сдвигового течения, у которого нормальная к направлению распространения волны компонента скорости зависит от вертикальной координаты.

Во **второй главе**, при сохранении общего анзаца полученного в первой главе, производится вычисление вертикальных волновых потоков тепла и соли. В силу того, что сдвиг фаз между колебаниями полей температуры (солености) и вертикальной скорости не равен $\frac{\pi}{2}$, вертикальные волновые потоки тепла и соли, как и в случае с импульсом, ненулевые. Показано, что вертикальная составляющая скорости стокова дрейфа в данных условиях тоже не равна нулю и, в частности для потоков соли, вносит определяющий вклад в вертикальный перенос.

В **третьей главе** получены численные расчеты для вертикальных потоков массы и вертикальной тонкой структуры поля плотности,

генерируемой волной. Ввиду наличия фазового сдвига для колебаний поля плотности и вертикальной скорости (аналогично первым двум главам), потоки массы будут ненулевыми, и прохождение волнового пакета приведет к появлению средней на временном масштабе волны поправки к плотности, называемой вертикальной тонкой структурой, носящей необратимый характер. В то время как инверсии поля средней плотности отсутствуют для текущей амплитуды волны. Для потоков массы, как и в случае с солью, определяющим оказался вклад от вертикальной составляющей скорости стокова дрейфа. Отметим, что расчеты в первых трех главах производятся для 15-минутных внутренних волн, исходя из натуральных данных, - именно такие волны наблюдались на северо-западном шельфе Черного моря.

В четвертой главе производится расчет и сравнение вертикальных потоков полей температуры, солёности и плотности в глубоководной области Черного моря и в области шельфа. Также рассчитана вертикальная тонкая структура, индуцированная прохождением волнового фронта. Автором получено, что масштаб тонкой структуры для шельфовой зоны превосходит обычный для больших глубин при одинаковой амплитуде волны. Вертикальная составляющая скорости стокова дрейфа вновь дает превалирующий вклад в вертикальный волновой перенос.

Оценка работы в целом. Диссертация Д. И. Воротникова является законченным исследованием в области динамики внутренних волн. Соискатель продемонстрировал владение как методами исследования динамики гармонических волновых пакетов в стратифицированных средах, так и численно-аналитическими методами решения сопутствующих задач. Основные результаты получены автором во многом самостоятельно, являются новыми и достоверными. Все математические выкладки при решении поставленной задачи строго обоснованы. Работа хорошо иллюстрирована графиками, облегчающими восприятие расчетов и сравнения результатов для разных глубин, в том числе в приведенном, относительном масштабе.

Тем не менее к работе можно предъявить следующие замечания.

1. Хотелось бы больше пояснений относительно параметра разложения ε . Как этот параметр ведет себя при приближении к области критического слоя, будет ли он по-прежнему малым?
2. Непонятно, почему для численного решения стационарной краевой задачи в диссертации был выбран метод Адамса 3-го порядка, предназначенный для решения эволюционных задач.
3. В качестве сопоставления данной модели динамики внутренних волн с экспериментом и её дальнейшей верификации, было бы неплохо добавить сравнение, например, наблюдаемой изменчивости термохалинной структуры с предсказанной в численно-аналитической модели.

Кроме того, обнаружены и редакционные замечания.

1. В п. 3 новизны в словосочетании «колебаниями данных термогидродинамических полей» слово «данных» лишнее, как несколько искажающее общий смысл всей фразы.
2. На стр. 16 автор утверждает, что «все представленные в научно-квалификационной работе (диссертации) результаты получены лично автором», хотя у него нет ни одной статьи без соавторства. Более того, только в менее половины количества статей соискатель является первым автором. Нужно было бы более точно определить личный вклад автора.
3. На стр. 16 вместо «...107 страницы» нужно было бы написать «...107 страниц».
4. На стр. 22 и 34 не лучшим образом перенесены формулы.
5. На стр. 29, после формулы (1.6) новое предложение начинается со строчной буквы.
6. Автор почему-то не счел нужным выразить кому-либо благодарности за помощь в подготовке диссертации.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.17. – «Океанология» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Воротников Дмитрий Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. – «Океанология».

Официальный оппонент

Дианский Николай Ардальянович

доктор физико-математических наук и доцент по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

главный научный сотрудник кафедры физики моря и вод суши физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет
Тел.: +7(905)797-94-12, e-mail: nikolay.diansky@gmail.com,

ND

ND Н.А. Дианский

Подпись официального оппонента д.ф.-м.н. Николая Ардальяновича Дианского заверяю

Ученый секретарь Ученого совета физического факультета МГУ,
доктор физико-математических наук, доцент

Стр
Стремоухов

