

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук Воротникова Дмитрия  
Игоревича  
на тему: «Процессы переноса, обусловленные инерционно-  
гравитационными внутренними волнами»  
по специальности 1.6.17. Океанология**

Диссертация Воротникова Д.И. посвящена исследованию процессов переноса, обусловленных внутренними волнами. Работа состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Во введении обосновывается актуальность, новизна, научная и практическая значимость работы. Вертикальный обмен – ключевой процесс, поддерживающий функционирование морской экосистемы. Сезонный и главный термоклины создают барьерные зоны для проникновения кислорода и биогенных элементов из-за сильной стратификации, которая подавляет мелкомасштабную турбулентность. Именно с мелкомасштабной турбулентностью ранее связывался вертикальный обмен. Однако в стратифицированной среде она подавлена и существует в виде отдельных, спорадически возникающих пятен. Эти пятна нередко создаются гидродинамической неустойчивостью течений и внутренних волн, а также путем обрушения внутренних волн. Таким образом, внутренние волны через обрушения способствуют вертикальному обмену в океане. Нередко внутренним волнам не обязательно обрушиваться, чтобы поддерживать уже сгенерированную турбулентность. Сдвиг скорости течения во внутренних волнах поддерживает уже сгенерированную турбулентность. Это «мягкий режим» поддержания турбулентности без обрушения внутренних волн. Но все равно в этом случае внутренние волны не непосредственно участвуют в вертикальном обмене, а через генерацию и поддержание турбулентности. В диссертации Воротникова Д.И. предлагается кардинально новый подход: вертикальные потоки тепла, соли, массы и импульса связываются именно с

внутренними волнами минуя генерацию турбулентности. Надо сказать, что такой подход применялся ранее в работах Слепышева А.А. (1997, 2015) применительно к внутренним волнам при учете турбулентной вязкости и диффузии. Тогда вертикальные волновые потоки тепла и соли были обусловлены сдвигом фаз между колебаниями температуры, солености, отличным от  $\pi/2$  из-за турбулентной вязкости и диффузии. Воротников Д.И. показал, что даже без учета турбулентной вязкости и диффузии указанные волновые потоки отличны от нуля при учете вращения Земли и среднего течения, компонента скорости которого, нормальная направлению распространения волны, зависит от вертикальной координаты. В этом случае уравнение для амплитуды вертикальной скорости внутренних волн имеет комплексные коэффициенты. Решение соответствующей краевой задачи – комплексное, а частота волны имеет малую мнимую часть. Соответственно сдвиг фаз между колебаниями температуры, солености и вертикальной скорости отличен от  $\pi/2$  и вертикальные волновые потоки тепла и соли отличны от нуля, вертикальные волновые потоки импульса также отличны от нуля, что и показано в первой главе. Краевая задача второго порядка для амплитуды вертикальной скорости линейного приближения имеет комплексные коэффициенты, причем их мнимая часть пропорциональна малому безразмерному параметру  $\varepsilon = V_{0*} / H\omega$ , где  $V_{0*}$  – характерное значение поперечной к направлению распространения волны компоненты скорости течения,  $\omega$  – характерная частота волны. Собственно по этому параметру в первой главе ведется разложение решения краевой задачи и частоты волны при применении метода возмущений. В нулевом порядке теории возмущений получается краевая задача для линейного дифференциального уравнения второго порядка с действительными коэффициентами. Данную задачу диссертант решает численно по неявной схеме Адамса третьего порядка точности для реальных профилей частоты Брента-Вяйсяля и скорости среднего течения. При заданной частоте волны волновое число находится

методом пристрелки. Построены дисперсионные кривые первых двух мод. Краевая задача для амплитуды вертикальной скорости в первом порядке по параметру  $\varepsilon$  – неоднородная. Линейное дифференциальное уравнение второго порядка приводится к самосопряженному виду и из условия разрешимости данной краевой задачи находится мнимая поправка к частоте волны. В первой главе получены вертикальные волновые потоки импульса, которые могут быть сравнимы с соответствующими турбулентными потоками, либо их превышать. Волновой поток импульса  $\overline{uw}$  отличен от нуля только при учете вращения Земли и при наличии течения, компонента скорости которого, нормальная направлению распространения волны зависит от вертикальной координаты. В этом случае поперечная к направлению распространения волны компонента скорости стокова дрейфа отлична от нуля и на порядок меньше продольной. Здесь  $u$  – компонента волновых возмущений скорости, направленная вдоль волнового вектора,  $w$  – вертикальная компонента. Волновой поток импульса  $\overline{vw}$  отличен от нуля и при отсутствии течения, но при учете вращения Земли, однако при отсутствии течения он на два порядка меньше.

Во второй главе делаются расчеты вертикальных волновых потоков тепла и соли на основе ранее введенного формализма в первой главе. Вертикальные волновые потоки отличны от нуля из-за того, что частота волны имеет малую мнимую часть, при этом сдвиг фаз между колебаниями плотности (температуры, солености) и вертикальной скорости отличен от  $\pi/2$ . Вертикальная составляющая скорости стокова дрейфа также отлична от нуля и вносит свой вклад в вертикальный перенос, причем ее вклад в вертикальный поток соли – определяющий. Вертикальный волновой поток соли у первой моды превышает турбулентный, у второй моды превышает турбулентный глубже 20 м на северо-западном шельфе Черного моря. Волновой поток тепла первой моды превосходит турбулентный в приповерхностном 20-метровом слое, глубже эти потоки сравнимы. У второй

моды волновой поток меньше турбулентного в верхнем 40-метровом слое. Расчеты в первых трех главах делаются для 15-минутных внутренних волн, которые наблюдались в натурном эксперименте на северо-западном шельфе Черного моря.

В третьей главе рассчитывается вертикальный волновой поток массы и вертикальная тонкая структура поля плотности, генерируемая волной. Вертикальный волновой поток массы отличен от нуля по причинам, указанным выше, и приводит к генерации средней на временном масштабе волны поправки к плотности – вертикальной тонкой структуре, которая имеет необратимый характер, т.е. после прохождения волны указанные деформации поля средней плотности остаются. При этом инверсии в поле средней плотности при рассматриваемой амплитуде внутренней волны не образуются. Определяющий вклад в вертикальный волновой поток массы вносит вертикальная составляющая скорости стокова дрейфа.

В четвертой главе проводится сравнительный анализ вертикальных потоков тепла, соли и массы и генерируемой волной тонкой структуры на северо-западном шельфе и в глубоководной части Черного моря. Показано, что генерируемые внутренней волной тонкоструктурные поправки больше на шельфе, чем в глубоководной части моря при той же амплитуде волны. Определяющий вклад в волновой перенос вносит вертикальная составляющая скорости стокова дрейфа. В целом, диссертация оставляет впечатление законченного исследования по рассматриваемой проблематике. Обладает достаточно высоким математическим и физическим уровнем. Но работа не лишена недостатков.

1. Нигде не указана величина безразмерного параметра  $\varepsilon$ , по которому ведется разложение в методе возмущений.
2. Если есть вертикальный волновой поток импульса, то приводит ли он к изменению среднего течения? В диссертации на эту тему ничего не сказано.
3. При решении неоднородной краевой задачи находится единственное решение, ортогональное нетривиальному решению однородной задачи.

Как эта процедура организована в ходе численного решения краевой задачи?

Указанные замечания не снижают значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова. 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.

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

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Гидрометцентр России»

Попов Сергей Константинович

тел.: 7(916)5282159, e-mail: skropov@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»)

123376, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, дом 13, стр. 1, тел. (499) 252-34-48, e-mail: [hmc@mecom.ru](mailto:hmc@mecom.ru)

Подпись сотрудника ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» С.К. Попова удостоверяю:

Директор ФГБУ «Гидрометцентр России»

С.В. Борщ

