

Тема работы:

Поверхностные и внутренние волны в течениях над сложной топографией

Состав коллектива:

Макаренко Николай Иванович, зав. каф. гидродинамики ММФ НГУ, д.ф.-м.н.

Мальцева Жанна Львовна, доц. каф. ВМ ММФ НГУ, к.ф.-м.н.

Галичкина Мария Александровна – аспирант ИГиЛ СО РАН

Денисенко Данила Сергеевич – аспирант ИГиЛ СО РАН

Кукушкин Дмитрий Евгеньевич – аспирант ММФ НГУ

Информация о гранте:

РФФИ 18-01-00648 «Генерация, трансформация и взаимодействие нелинейных поверхностных и внутренних волн в жидкости»,
рук. Н.И. Макаренко, 2018-2020

Научное содержание работы:**1. Постановка задачи.**

Математическая формулировка предполагает построение решения краевых задач для системы нелинейных уравнений Эйлера тяжелой неоднородной жидкости в неограниченной области. На свободных границах и поверхностях раздела слоев жидкости требуется выполнение нелинейных кинематических и динамических граничных условий. В случае двумерных стационарных течений исходная задача сводится к решению квазилинейного эллиптического уравнения Дюбрей-Жакотэн-Лонга с соответствующими условиями излучения или затухания вверх и вниз по потоку.

2. Современное состояние проблемы.

Придонные течения являются объектом активного изучения в океанологии, поскольку в них происходит интенсивное перемешивание холодных донных слоев с более теплыми вышерасположенными слоями [Mantyla, Reid 1983; Morozov, Demidov, Tarakanov, Zenk 2010]. При этом наибольший интерес вызывает изучение гидродинамических механизмов, действующих в течениях над донными препятствиями. Исследование волновых конфигураций в стратифицированной морской воде, адаптированных к реальной топографии дна, также представляет большой интерес, поскольку в натуральных условиях эти структуры создают крупномасштабный фон, на котором развиваются локальные нестационарные процессы. Характерным свойством таких течений является фрагментация волновых полей, возникающая как совместный результат волновой анизотропии стратифицированной среды и интерференции внутренних волн. Мозаичные двумерные структуры внутренних волн в течениях над сложным рельефом возникают из-за местного преобладания какого-либо из конкурирующих факторов: доминирования гидростатической моды над волновыми модами в придонном слое; наложения цугов столбовых мод внутренних волн, генерируемых наклонно вверх соседними порогами; нелинейной фокусировки модулированных волновых пакетов. В глубоководных потоках наблюдается большое многообразие квазистационарных режимов типа бегущих волн, а также нестационарных и переходных процессов, связанных с развитием неустойчивостей. Один из таких примеров дают результаты натуральных измерений во входном каньоне экваториального разлома Романш, выполненных в октябре 2013 года в экспедиционном рейсе НИС «Академик Сергей Вавилов». В придонном слое на глубине 4700 м были зарегистрированы цуги интенсивных внутренних волн, которые сопровождалась

возникновением экстремально длинных серий вихрей Кельвина – Гельмгольца [Van Haren, Gostiaux, Morozov, Tarakanov: Geophys. Res. Lett. 2014]. Пакеты волн солитонного типа, заметно отличавшихся друг от друга по форме и амплитуде, медленно распространялись вдоль слабого придонного термоклина. Каждая из таких отдельных волн проходила мимо “окна” наблюдения (заякоренной гирлянды термисторов) примерно за час. Их скорость распространения была практически одинаковой из-за слабой амплитудной дисперсии в условиях глубоководной стратификации. Указанные нелинейные волны с амплитудами 30-50 м служили генератором сдвиговой неустойчивости течения, что приводило в итоге к их разрушению. Описанный вихреволновой механизм перманентного перемешивания в абиссальных слоях адекватно воспроизводится в рамках модели длинных волн с дисперсией, одновременно учитывающей слабость скачка плотности на границе раздела слоев и малость градиентов плотности внутри слоев.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Основные трудности при исследовании рассматриваемого класса задач возникают из-за их нелинейности, неограниченности области течения, наличия неизвестных границ раздела слоев и криволинейной формы дна. Численные расчеты даже двумерных течений в этом случае сопряжены с большими затратами машинного времени, что сильно затрудняет проведение вычислений при построении карт волновых режимов. Аналитическая часть используемого полуаналитического подхода связана с предварительным построением иерархии приближенных подмоделей.

Построение нелинейной дисперсионной модели второго приближения теории длинных волн использует частичное разложение искомых функций в системе уравнений Эйлера тяжелой неоднородной несжимаемой жидкости. В ней рассматривается схема течения с непрерывной стратификацией жидкости внутри слоев и скачком плотности и скорости на поверхности раздела. В указанной многопараметрической модели присутствуют:

- а) пара плотностных чисел Фруда, представляющих нормированную фазовую скорость волны относительно каждого из слоев;
- б) параметры Буссинеска, характеризующие градиенты плотности внутри слоев;
- в) число Атвуда, задающее перепад плотности на границе раздела слоев;
- г) геометрические параметры, характеризующие глубины слоев и амплитуду волны.

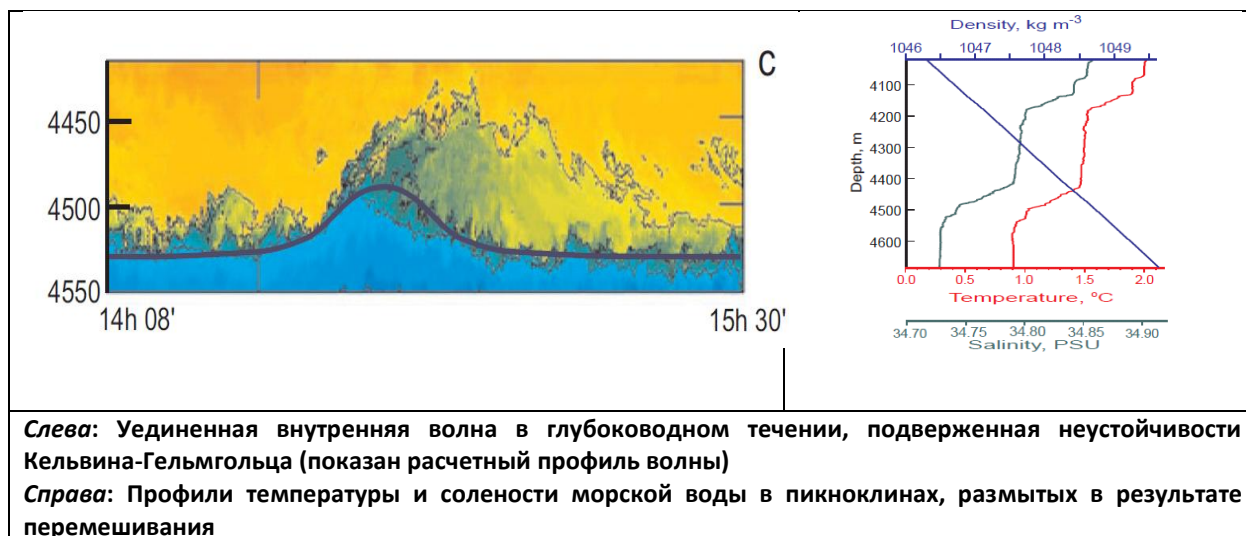
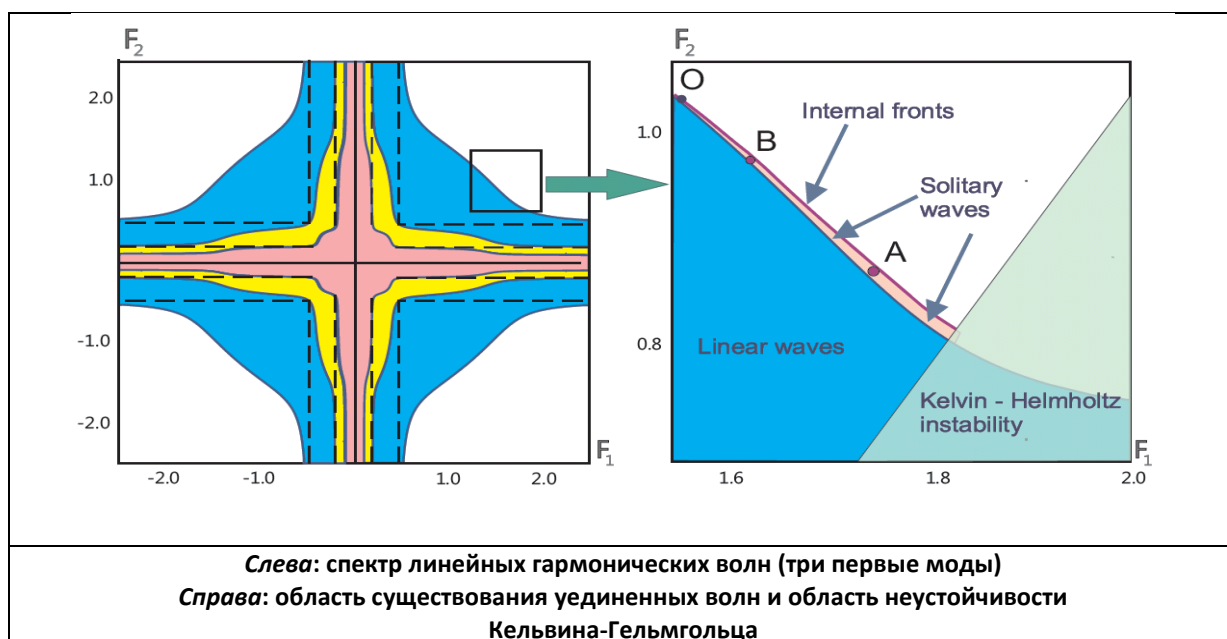
При выводе приближенных уравнений использовались пакеты программ символьных вычислений (компьютерная алгебра). При построении приближенных решений использовались метод нормальных мод и метод возмущений по малым параметрам нелинейности и дисперсии. Для численного расчета течений в областях с криволинейными границами использовалось преобразование к канонической расчетной области в полулагранжевых переменных.

В рамках предложенной математической модели построена карта режимов типа бегущих волн в плоскости чисел Фруда, которые являются ключевыми спектральными параметрами. Тестирование решений было проведено на основе натуральных экспериментальных данных. На основе построенных решений проведен анализ гидродинамических механизмов, приводящих к трансформации стратифицированных потоков в результате генерации внутренних волн и развития неустойчивостей. Показано, что возникновение интенсивного волнового перемешивания в придонных слоях обусловлено частичным наложением зоны неустойчивости Кельвина – Гельмгольца на параметрическую область уединенных волн.

4. Полученные результаты.

Параметры уединенных волн, наблюдавшихся во входном каньоне разлома Романш в придонных слоях на глубине порядка 5000 м, качественно и количественно хорошо согласуются с результатами расчетов. В частности, модель воспроизводит аномально слабую амплитудную дисперсию сильно нелинейных волн в глубоководных течениях. Характерный временной период для таких внутренних волн составляет от одного до полутора часов. Эти медленные волны служат генератором перманентной неустойчивости вследствие локального усиления сдвига скорости в окрестности вершины волны и ее последующего обрушения. Такая маргинальная устойчивость нелинейных волновых структур объясняет механизм образования наблюдающихся в разломах Срединно-Атлантического хребта экстремально длинных вихревых серий в придонных потоках, которые приводят к интенсивному перемешиванию глубинных вод.

5. Иллюстрации, визуализация результатов.



6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Предварительные расчеты, выявляющие характерные свойства придонных течений, проводились на персональных компьютерах с использованием моделей-лоцманов. Серийные расчеты в рамках нелинейных моделей высокого уровня точности выполнялись на суперкомпьютерном кластере НГУ, без которого было бы невозможно получить результаты.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

Makarenko N.I., Maltseva J.L., Morozov E.G., Tarakanov R.Yu., Ivanova K.A. Internal waves in marginally stable abyssal stratified flows // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2018. V.25. P. 659–669.

DOI: 10.5194/npg-25-659-2018 Импакт-фактор JCR 2018 = 1.65

Makarenko N.I., Maltseva J.L., Morozov E.G., Tarakanov R.Yu., Ivanova K.A. Steady internal waves in deep stratified flows // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. V.60, N2. P. 248-256.

DOI:10.1134/S0021894419020068 Импакт-фактор JCR 2019 = 0.669

Макаренко Н.И., Ляпидевский В.Ю., Денисенко Д.С., Кукушкин Д.Е. Пакеты нелинейных внутренних волн в шельфовой зоне // *Вычислительные технологии*. 2019. Т.24, № 2. С. 90-98. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.2.008 Импакт-фактор РИНЦ 2017 = 0.625

Denisenko D.S., Makarenko N.I. Trapped solitary waves over an uneven bottom // *European Physical Journal Plus*. 2020. V.135:673

DOI: [10.1140/epjp/s13360-020-00673-5](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00673-5) Импакт-фактор JCR 2020 = 2.710.