

ОТЗЫВ

официального оппонента Абрашкина Анатолия Александровича
на докторскую диссертацию Рыжова Евгения Андреевича
“Динамика квазигеострофических вихрей при наличии сдвиговых потоков
и топографических преград”
по специальности 25.00.28 - Океанология

Диссертация Рыжова посвящена динамике океанических вихрей. Изучается как движения в ансамбле свободных вихрей, так и их взаимодействие с внешними потоками и топографическими преградами. Размеры вихрей не превышают синоптический масштаб (радиус Россби). Наряду со свободными в работе рассматриваются и топографические вихри, образующиеся вблизи подводных возвышенностей. Автор использует по преимуществу геострофические модели, и потому объединяет изучаемые вихри общим названием квазигеострофические, что и отражено в названии диссертации.

Актуальность темы исследования не вызывает сомнений. Хотя когерентные вихревые структуры в океане были открыты около полувека назад, вал теоретических и экспериментальных работ, посвященных им, с каждым годом нарастает. В последнее время поля скорости океанических вихрей активно изучаются методами спутниковой альtimетрии. Это связано, в первую очередь, с осознанием их важнейшей роли в динамике океана. Стоит подчеркнуть также крайне весомый (по некоторым данным более 50 процентов) вклад мезо- и субмезомасштабных вихрей в общую энергетику океана. В теоретическом плане Рыжов использует классические подходы геофизической гидродинамики, включая двух- и трехслойные модели океана. Особую значимость работе придают численные исследования лагранжевого хаоса (хаотического поведения жидких частиц) в поле регулярных вихревых структур. Эти результаты можно по праву назвать “изюминками” диссертации.

Диссертация состоит из Введения, шести глав, Заключения и Списка литературы. Во Введении обосновывается актуальность работы, формулируются ее цели и задачи, приводятся положения, выносимые на защиту, и указывается степень ее достоверности (общее количество статей в рецензируемых журналах – 34, и список конференций, где докладывались результаты работы – 9 Всероссийских и 11 Международных научных форумов).

Первую главу следует охарактеризовать, как широкое и содержательно насыщенное погружение в многообразные направления вихревой динамики океана. Рыжов дает возможность представить важность проблемы возникновения и эволюции вихрей в океане и вместе с тем указывает спектр различных подходов для ее изучения. Следует сразу же

отметить глубокое вхождение автора в суть проблематики и знакомство с литературой по существу вошедших в диссертацию задач.

Во второй главе излагается модель тороидального топографического вихря в вязкой вращающейся жидкости в приближении f - плоскости. Автор строит пространственное линейное решение на фоне заданного осесимметричного течения, моделирующего топографический вихрь в нулевом приближении. В отличие от модели В.Н. Зырянова (ДАН. 2009; J. Mar. Res., 2011), в качестве фонового выступает не круговое движение жидкости между двумя вращающимися цилиндрами (течение Тэйлора-Куэтта), а вихрь Рэнкина, для которого азимутальная скорость на периферии спадает. Уравнения для возмущений сводятся к системе уравнений Гельмгольца, которую диссертант решает с помощью численных методов. Построены вихри с одной, двумя и тремя ячейками в поперечном сечении, соответствующие разным собственным функциям рассматриваемой задачи.

В третьей главе изучается взаимодействие свободных вихрей с изолированной топографической возвышенностью. Возвышенность предполагается дельтообразной, а топографическое течение моделируется полем скорости, индуцируемым точечным вихрем. В параграфе 3.1 рассматривается трехслойная квазигеострофическая модель движений жидкости на f – плоскости. В систему вводится сингулярный (точечный) вихрь, который вначале помещается в средний, а затем в верхний слой жидкости. На суммарное поле взаимодействия топографического и свободного вихрей накладывается однородный нестационарный поток, гармонически изменяющийся со временем. Анализ динамики свободного вихря проводится с помощью сечений Пуанкаре. Исследованы режимы регулярной (свободный вихрь в верхнем слое) и нерегулярной (вихрь в среднем слое) динамики.

В параграфе 3.2 изучается взаимодействие пары точечных вихрей с равными и противоположными по знаку интенсивностями с топографической преградой, которая по-прежнему моделируется точечным вихрем. Особенностью такого трехвихревого взаимодействия является то, что топографический вихрь неподвижен (закреплен в точке преграды). Это условие в значительной степени упрощает исследование динамики пары движущихся вихрей, что автор с блеском и осуществляет. В параграфе 3.3 описывается эффект переноса такой вихревой парой (модоном) примеси (жидких частиц, составляющих его атмосферу). В ходе численного расчета автор вводит 10^4 маркеров и следит за их распределением в процессе взаимодействия модона с топографическим вихрем. Методом анализа сечений Пуанкаре выявлен режим разрушения регулярных движений и появления зоны "хаотического моря" (Кузнецов Л., Заславский Г.М.).

В параграфе 3.4 уже в модели двухслойной жидкости исследуется взаимодействие цилиндрической преграды с хетоном. Каждый из слоев жидкости имеет свою постоянную плотность. Движение хетона изучается в геострофическом приближении на f – плоскости. Рыжов выделяет два кардинально разных сценария движения хетона: “рассеяние” на топографическом вихре и его захват придонным возвышением. Продемонстрировано существенное отличие динамики хетона от вихревой пары, рассмотренной в предыдущих параграфах. Чертцы нерегулярной динамики у вихрей, составляющих хетон, выражены более ярко.

В четвертой главе рассматриваются два примера обтекания неоднородностей плоской поверхности при наличии в потоке точечных вихрей. В первом случае анализируется форма и устойчивость атмосферы у вихрей за цилиндром (вихри Фёппля) по отношению к синусоидальным по времени возмущениям однородного потока, а также к малым смещениям центра вихря. Продемонстрирована возможность хаотической адвекции жидких частиц из атмосферы (рециркуляционной зоны) во внешний поток при колебании вихрей вокруг их равновесных положений. Вторая модель изучает динамику точечного вихря вблизи окружной выемки в плоскости. Автор получает красивое точное решение, свойства которого подробно исследует уже численно. В зависимости от угла, под которым выемка подходит к плоскости, и скорости потока могут реализоваться различные режимы движения вихря. Наиболее интересным представляется сценарий, когда он вначале захватывается выемкой, какое-то время совершает колебательные движения в ее окрестности, а затем вырывается во внешний поток.

В пятой главе изучается течение, индуцируемое двумя точечными вихрями, находящимися в нестационарном линейном по пространственным координатам внешнем поле скорости. Новизна авторского подхода состоит в том, что завихренность внешнего двумерного потока задана как функция времени. Автор детально анализирует сценарии параметрической неустойчивости системы. Помимо баротропного приближения, данная задача решается также в двухслойной модели для квазигеострофических движений на f – плоскости и для трехслойной модели (пара точечных вихрей с равными по величине и противоположными по знаку интенсивностями) расположены в среднем слое. Эта глава – самая большая по объему (58 страниц), и она, в первую очередь, отражает крепкие математические навыки доктора философии. Объединение аналитических и численных подходов позволяет проанализировать крайне сложные режимы поведения данной динамической системы. Особенно впечатляет разобранный до тонкостей сценарий пересоединения сепаратрис.

В шестой главе автор отходит от излюбленной им темы сингулярных вихрей и обращается к моделям эллиптического и эллипсоидального вихря. Автор изучает влияние мелкомасштабной (турбулентной) диффузии на форму границ вихря для различных режимов его эволюции. Показано, что в режимах нерегулярной динамики поток жидких частиц наружу усиливается.

В Заключении сформулированы основные результаты работы. Все они получены диссидентом или при его непосредственном участии.

Диссертация оставляет приятное впечатление. Рыжов рассмотрел разнообразные аспекты динамики мезо- и субмезомасштабных вихрей в океане. Вместе с тем он сумел объединить их общей идеей, концентрируя внимание на анализе траекторий движения вихрей и жидких частиц (лагранжевых характеристик потока). Диссертация изобилует множеством примеров хаотического поведения детерминированных систем вихрей, и это, паряду с аналитическими результатами выступает ярким свидетельством хорошо сделанной научной работы, в ходе которой автор проявил себя и как теоретик, и как грамотный и опытный вычислитель. Работа написана ясным языком, в каждом из разделов работы автор демонстрирует эрудицию и хорошее знакомство с литературой по затрагиваемым вопросам. Множество иллюстраций облегчает чтение и понимание результатов исследования.

Вместе с тем следует указать и ряд замечаний:

По названию:

- Орфографический словарь-справочник (Б.З. Букчина, Л.П. Какалуцкая. М.: Русский язык, 1998) рекомендует писать слово “квазигеострофический” без дефиса. Дефис используется при английском написании этого термина.

По первой главе:

- Содержание параграфов 1.1, 1.2 не имеет непосредственного отношения к конкретным вопросам, обсуждаемым в диссертации. В силу этого представляется, что было бы более уместным сократить их и объединить под общим заголовком – “Лагранжевые когерентные образования в океане”, дав им (когерентным образованиям) более подробную характеристику. Использование выражения “лагранжевая динамика” в названии первой главы представляется неудачным, поскольку оно предполагает вычисления в лагранжевых переменных.

- Вместе с тем содержание параграфов 1.3, 1.4 хорошо было бы расширить. Обзору 197 работ автор уделяет менее 6 с половиной страниц. Этого явно недостаточно. Так, понятиям “компенсированный вихрь”, “хетон”, “модон”, используемым автором на странице 21, не дается должного разъяснения. В последовательности представляемых

статьей отсутствует четкая систематика. Думается, автору следовало бы выделить в рамках параграфов 1.3, 1.4 отдельные подпункты и снабдить их заголовками, обозначающими разные направления исследований.

В тексте автор приводит только номер статьи в библиографическом списке. В силу его огромности (всего 597 наименований) такой подход следует признать правильным. Но было бы замечательно, если бы автор, рассказывая историю вопроса, все-таки выделил бы пионерские работы и указал их авторов (оговорив, что делается это для лучшего понимания, как в действительности формировалось данное направление вихревой динамики).

По второй главе:

- В одном из уравнений модели (2.6), (2.7) рассматривающей линейные пространственные возмущения на фоне вихря Рэнкина (глава 2), присутствует разрывный коэффициент $\frac{dV_0}{dr}$. На поверхности $r = r_1$ он скачком меняет знак. В связи с этим возникает вопрос об устойчивости построенного решения.

- Автор использует модель вязкой жидкости. Условие прилипания на дне для построенного торoidalного вихря не выполняется, что опять-таки не оговаривается при анализе решения.

По третьей главе:

- В формуле (3.3) второе соотношение противоречит первому.

- Значения параметров (с. 40) нигде далее не используются. Среди них отсутствуют конкретная высота дельтообразной преграды (для оценки малого параметра) и скорость потока, которым она обтекается. Их соотношение влияет на картину обтекания преграды. К примеру, позади нее может образоваться застойная область или вихрь, и тогда решения (3.6) уже будут несправедливы.

- Не указано, на какие величины нормированы скорости и расстояния на графиках 3.1, 3.2.

- Автор выстраивает последовательность изучаемых моделей в главе так: трехслойная, однослойная, двухслойная. Это головокружительно для читателя. Было бы разумней, и более выигрышно, начать изложение с динамики трех вихрей, потом перейти к четвертому и закончить главу трехслойной моделью с сингулярным вихрем.

По четвертой главе:

- В первом равенстве соотношения (4.8) введен числовой коэффициент γ , который имеет разрыв при $y = 0$. В силу этого отображение $\zeta(z_2)$ не является конформным.

По пятой главе:

- Условия (5.6) были получены Уильямом Томсоном (lordом Кельвином), поэтому ссылка на работы [435], [440] неуместна.

- Величины $A(t), B(t)$ (стр. 101, после формулы (5.31)) не являются “компонентами равномерного внешнего потока”, поскольку зависят от времени.

По шестой главе:

- В работах [567, 568] рассматривается диффузия потенциальной завихренности из области вихревого ядра к периферии. Она не связана непосредственно с перетоками жидких частиц через его границу.

По списку литературы:

- Монографии Педлоски [314], Заславского [354], Милн-Томсона [397], Сэффмена [427] переведены на русский язык, и более правильно было сделать ссылки на их перевод.

- Досадным недоразумением выглядит ссылка на переводной вариант статьи из отечественного журнала ЖЭТФ [471].

- Автору следовало бы вставить в список литературы следующие работы, имеющие непосредственное отношение к рассматриваемым в диссертации задачам:

Абрашкин А.А., Якубович Е.И. О плоских вихревых течениях идеальной жидкости // ДАН СССР. 1984. Т. 276. №1. С. 76-78, где найден класс точных решений для 2-D вихрей, обобщающий решение для вихря Кирхгофа.

Абрашкин А.А. К теории взаимодействия двух плоских вихрей // Изв. АН СССР. Мех. жидк. и газа. 1987. №1. С. 62-68, где в лагранжевых переменных, независимо от работы [437], получен аналогичный результат.

Абрашкин А.А. Обтекание неоднородностей плоской поверхности с образованием присоединенного вихря // Ж ПМТФ. 1988. №5. С. 81-84, где построено единственное точное аналитическое решение для задачи обтекания с распределенным вихрем.

Данные замечания, однако, ни в коей степени не снижают высокой научной ценности диссертации Рыжова Евгения Андреевича. Она представляет законченное научное исследование, удовлетворяет всем требованиям ВАК, а ее автор, бесспорно, заслуживает степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.28 – Океанология.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Официальный оппонент,

Доктор физико-математических наук

А.А. Абрашкин

ПОДПИСЬ *А.А. Абрашкина*

ЗАВЕРЕНА НАЧАЛЬНИКОМ

ОТДЕЛА КАДРОВ

Н.А. Ермолиной