

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Чхетиани О.Г.

на диссертацию Рыжова Евгения Андреевича

«Динамика квази-геострофических вихрей при наличии сдвиговых потоков и топографических преград»,

представленной на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук по специальности 25.00.28 – океанология

В последние годы интенсивное развитие методов дистанционного зондирования явлений на поверхности и в верхнем слое морей и океанов, в атмосферных пограничных слоях помогло выявить сложную структуру происходящих здесь движений, продемонстрировало их несомненную вихревую природу, высокую степень когерентности и организованности, устойчивости и повторяемости. Роль исследований, комбинирующих аналитические и численные подходы и позволяющие на основе относительно простых моделей, учитывающих, вместе с тем, основные процессы, проанализировать достаточно сложные явления, проявляющие одновременно регулярную и стохастическую природу, в настоящее время особо ценна!

В этой связи, новые и яркие результаты, представленные в диссертационной работе Е.А. Рыжова, направленной на изучение регулярной и нерегулярной динамики вихревых структур и их транспортных свойств с учетом взаимодействия с топографическими объектами и на фоне сдвиговых течений представляют собой заметное продвижение в этом направлении. Актуальность проведенных исследований обусловлена особой и заметной ролью таких структур в обменных процессах как в самих воздушных и водных средах, так и при их взаимодействии.

Представляемая работа представляет собой успешный синтез аналитических и численных подходов к исследованиям линейной и нелинейной эволюции вихревых структур, их регулярной и стохастической динамики.

Результаты, полученные соискателем, имеют несомненную практическую и теоретическую значимость, раскрывая детали достаточно сложного взаимодействия вихревых структур при наличии неоднородных потоков и топографических преград и могут быть использованы при развитии методов спутниковой альтиметрии и

океанических моделях высокого разрешения, в частности, для параметризаций подсеточных процессов.

Во введении рассказывается об актуальности темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обсуждается новизна и значимость результатов, кратко говорится о методах исследования и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится детальный обзор работ по анализу мезомасштабных вихрей в океане. Рассказывается о результатах многолетних наблюдений за траекториями дрейфтеров в различных морях и океанах, оценки их вклада в общую энергетику океанических потоков, алгоритмах детектирования вихрей – прямых и гибридных с применениями методов и подходов теории динамических систем, численных моделей циркуляции. Отмечается, что общие закономерности динамики изолированных вихрей изучаются с помощью упрощенных динамических моделей, позволяющих ограничить набор факторов, влияющих на динамику вихрей с дальнейшим анализом возможного вклада каждого из них. Основным преимуществом анализа небольшого набора факторов является возможность явного выделения их влияния и значимости в таких моделях. В главе проведен достаточно детальный обзор аналитических представлений для изолированных океанических вихрей и их ансамблей и связанных с ними задач по динамике и устойчивости, процессам переноса. Собственно, настоящее исследование и посвящено изучению подобных моделей, их свойств и, вызываемых эффектов для вихревых структур океана.

Вторая глава посвящена моделям топографических вихрей над изолированными преградами. Особенностью исследования является учет вертикальной структуры течения в таких образованиях. Также, в отличие от прежних постановок, вместо использования двух жестких вертикальных непроницаемых границ поставлено прозрачное невозрастающее граничное условие, что позволяет получить квазитрехмерный тороидальный вихрь уже в окрестности простой цилиндрической возвышенности. Следует заметить все же, что представление для вертикальной зависимости (2.8) хотя формально и удовлетворяет условиям непротекания и проскальзывания, но не вполне описывает реальность для задач с учетом вязкости. Скорее всего, поправки не приведут к заметным количественным изменениям в детально рассмотренной дальше спектральной задаче для радиальной зависимости.

Здесь хотелось бы отметить успешное использование метода инвариантного погружения.

В третьей главе рассмотрено взаимодействие монополярных и дипольных вихрей с топографическими подводными преградами и, возникающим при этом переносе жидкости (и примеси). Рассматривается трехслойная квазигеострофическая жидкость на f -плоскости с введением сингулярных монополярных точечных вихрей в верхнем и среднем слоях. Фоновый поток индуцируется дельтаобразной горой. Интерес к трехслойной модели обусловлен задачами, связанными с рассмотрением движений не только поверхностных вихрей, но и глубинных структур, таких как внутри-термоклинные линзы. На наш взгляд, здесь были бы уместны рисунки, поясняющие рассматриваемые гидродинамические конфигурации. Движения вихрей могут быть хаотическими, поэтому использовать сечения Пуанкаре нельзя. Необходимо записать уравнения движения жидкой частицы в среднем и верхнем слоях, которое генерируется и фоновой составляющей и соответствующим вихрем в соответствующем слое. Расчеты ведутся для этой сложной системы. В формуле 3.33 должен стоять натуральный логарифм.

Отмечается, что центр свободного вихря не испытывает влияния от поля скорости, генерируемого этим вихрем. То есть, центр движется как пассивная частица в поле скорости, индуцируемом топографией и внешним потоком. Это позволяет распространить результаты по движению пассивных частиц в таком поле, изложенные во второй главе распространить на движение центра свободного сингулярного вихря. Также отмечено, что в случае если скорость внешнего потока постоянна, то в окрестности топографической преграды образуется область рециркуляции, размер которой зависит от скорости внешнего потока. Помещая свободный вихрь в эту зону рециркуляции, получим, что сам вихрь будет двигаться по замкнутым линиям тока и никогда не покинет данную область периодического движения. Если поместить вихрь в область проточного течения, то вихрь будет двигаться по невозмущенным линиям тока и удалится вместе с течением.

Рассматривается лагранжев перенос жидких частиц, индуцируемый взаимодействием свободного вихря и топографического вихря. В качестве меры адвективного переноса вычислялось время выноса жидких частиц из области влияния топографического вихря во внешний неограниченный поток - характеристика являющаяся аналогом накопленных показателей Ляпунова, как указывающую на области интенсивного перемешивания. Для ее вычисления были равномерно

распределены 10^4 маркеров внутри невозмущенного топографического вихря, и отслеживалось время, за которое маркер пересекал контрольную линию свободного вихря и топографического вихря. Здесь приведено множество интересных наблюдений. Известно, и в простейшей постановке задачи (без сингулярных вихрей) картина при возмущениях внешнего потока сложная. Стоило бы провести сравнение результатов решения этих задач для лучшего восприятия.

Дальше исследуется взаимодействие самодвижущегося диполя с изолированным топографическим препятствием. Такая конфигурация является одним из вариантов задачи о трех вихрях. Рассматриваются симметричная и несимметричные конфигурации. Обнаружено, что возможны две динамические картины: (1) после взаимодействия с фиксированным вихрем, диполь продолжает свое самоиндуцированное движение на бесконечность, (2) диполь захватывается в окрестности вихря и совершает колебательные движения в ограниченной области. Оба данных типа взаимодействия порождают перенос пассивных жидких частиц, как регулярный, так и хаотический. Далее анализируются различные режимы переноса жидких частиц, вызванного вихревым взаимодействием. Рис. 3.15 стоило бы сделать более внятным. Рассматривается на довольно большом расстоянии натекание диполя на вихрь. Плечо диполя мало, и размер облака частиц дипольных слишком мал на рисунке. Увидеть на рисунке 3.15.d распределение частиц после прохождения диполя не представляется возможным. Тогда и не надо было этого рисунка. А описать словами все, тем более, что там тоже ничего особо интересного нет. Рисунки 3.16 и 3.17 довольно интересны в плане хода кривой. Но в первом зависимость от угла (видимо, в радианах?), а во втором зависимость от интенсивности диполя. Правда, оси отмечены одинаковыми буквами с идентичной шкалой?

Далее с использованием точечных вихрей рассматривается двухслойная компенсированная вихревая пара - хетон, взаимодействующая с подводной возвышенностью цилиндрической формы. Динамика таких вихревых образований в различных средах представляет существенный интерес. Для устойчивого хетона выделяются типичные режимы движения, включая режимы нерегулярной динамики. Рассмотрены взаимодействие с подводной преградой, режимы захвата хетона.

В четвертой главе рассмотрено поведение изолированного вихря при наличии цилиндрической преграды, располагающейся на всей глубине баротропного потока. Известно, что при набегании направленного потока на такой изолированный «остров», за ним будет образовываться замкнутая область рециркуляции жидких

частиц. Такой процесс называется вихревым шеддингом, он является начальным этапом появления широко-известного феномена – вихревой дорожки фон Кармана. Простейшей моделью для описания вихревого шеддинга является вихревая модель Фёппля, которая и рассмотрена в данной главе в стационарных и нестационарных конфигурациях с возникновением хаотизации (рис. 4.5). На рис. 4.4 не указано направление вращения вихря. Отметим, что этот раздел достаточно сложный, с множеством «острых» углов.

Также в главе рассматривается влияние искривленной границы. В простейшем случае прямолинейной границы, вихрь будет двигаться вдоль границы прямолинейно и равномерно. Однако наличие изгибов границы приведет к появлению областей рециркуляции, в которых вихрь может надолго задерживаться. Рассмотрена прямолинейная граница с единственной выемкой в форме сектора окружности. Динамика точечных вихрей в областях с криволинейными границами представляет интерес, как с точки зрения приложений вихревой динамики, так и с точки зрения общей теории динамики точечных вихрей. Для приложений, например, для исследования вихревой динамики в океане, необходимо учитывать сложные береговые границы и их влияние на движение изолированных когерентных структур. Известны случаи захвата вихревых структур внутрь бухт. Здесь автор естественно и красиво использует конформные отображения. Интересно, что симметричная картина стационарных линий тока дает несимметричную картину сечений Пуанкаре при возмущениях встречного потока. Есть ли этому объяснение? Довольно интересно объяснено про частоты (стр. 88-90) и их роль в развитии хаотизации.

Пятая глава, пожалуй, самая интересная глава в диссертации.

Не очень понятно про задачи, изложенные в 5.1 и 5.2, где поведение системы из двух точечных вихрей во внешнем потоке сводится к уравнению типа Хилла с дальнейшим его анализом для разных условий и определением областей параметрического резонанса. Кто все же первым проводил подобное рассмотрение? Нет четкого ответа, много места занимает достаточно интересное изложение результатов. Дальше выполнено обобщение на случай системы из многих вихрей, поведение которой может свестись к анализу динамики центра завихренности.

Довольно содержательно выглядит параграф 5.4, где рассмотрена параметрическая неустойчивость в окрестности эллиптических особых точек в системе двух точечных вихрей, помещенных в переменный деформационный поток. Отмечается, что параметрический резонанс никак не соотносится с появлением

хаотической динамики в нелинейных системах. Сравнение сечений Пуанкаре показывает, что более эффективная хаотизация соответствует набору параметров, при которых не наблюдается параметрическая неустойчивость в линейном приближении. Более того, в условиях линейной параметрической неустойчивости, вообще, сепаратриса нелинейного резонанса в окрестности эллиптической точки практически не разрушена. В то же время, меньшая частота возмущения индуцирует эффективное разрушение сепаратрисы нелинейного резонанса в окрестности стационарной эллиптической точки и, как следствие, появление большого количества хаотических траекторий. Таким образом, данное сравнение показывает, что появление хаотических траекторий в той или иной области фазового пространства связано исключительно с пространственным распределением нелинейных резонансов и никаким образом не связано с параметрической неустойчивостью в соответствующей линейной системе.

После 5.5 идут описания сложных конфигураций с множеством пересоединений сепаратрис. Рис.5.12 характеризует сложность явлений. Интересен вопрос: имеется набор хаотических точек на сечении Пуанкаре, и происходит сброс точки куда-то с регулярной траектории. Она куда ушла? Во внешнюю область или все еще в вихревой остается? Интересно рассмотрение хаотического переноса жидких частиц в 5.5.3 при смещениях вихрей из положений равновесия. Особо эффектный рисунок 5.17 на стр. 124, где видно, как разделенные сепаратрисные слои сливаются с формированием «стохастического» моря при наличии доминантного вращения. В конце страницы – опечатка со временем интегрирования, также как и на следующей странице. Далее рассматривается подобная система, но уже в двуслойном случае.

В заключительной части данной главы рассмотрим особенный режим двух-вихревой системы – самодвижущуюся вихревую пару. Такая структура представляет собой два вихря одинаковых интенсивностей, но противоположного направления вращения. В отсутствии каких-либо ограничений, такая структура перемещается равномерно и прямолинейно на неограниченные расстояния. Подобная модель описывает грибовидные течения, известные указывают на эффективными транспортными свойствами и высокой устойчивостью. В 5.107 должен стоять натуральный логарифм. Результат хорошо проиллюстрирован на рис. 5.33, где приведены сечения Пуанкаре при различных параметрах. Как видно из рис. 5.33, диполь в пульсирующем сдвиговом потоке переносит значительно больший объем жидкости, по сравнению с простым самораспространяющимся диполем. Причем

некоторые жидкие частицы переносятся на конечных временах, значение которых зависит от начальных положений частиц.

В шестой главе рассмотрены модели эллиптических и эллипсоидальных вихрей в баротропном и линейно-стратифицированном бароклинном деформационных потоках. Используются результаты предыдущей главы. Результат приведен на рис. 6.6, который недостаточно объяснен. Отмечается, что траектории жидких частиц внутри самого вихря (серая область на рисунках) всегда остаются регулярными и не могут пересекать границу вихря. Для того, чтобы такие пересечения имели место, рассматривается мелкомасштабная диффузия, вводимая как в систему в виде флуктуационного поля скорости, неточно называемого на стр. 166 диффузионным членом. Рассмотрены случаи, как только горизонтальной диффузии, так и с учетом вертикальной. Результаты, впрочем, не являются неожиданными (рис. напр. 6.9), но представляет интерес их развитие на другие системы, рассмотренные ранее в диссертации или рассмотрение влияния флуктуаций с разными временными корреляционными функциями самого фонового сдвигового течения. Представляется, что может наблюдаться как субдиффузионное, так и супердиффузионное поведение для дисперсии частиц. На стр.171 приведены оценки физические числовые оценки, к сожалению, практически отсутствующие в диссертации. Их могло бы быть много больше.

В Заключение кратко сформулированы основные результаты работы, в частности:

Показано, что тороидальный топографический вихрь может появляться в неограниченной баротропной жидкости в окрестности топографической преграды произвольного кусочно-постоянного профиля. Физически допустимые значения числа Экмана могут приводить к появлению множественных тороидальных вихрей в окрестности изолированных топографических преград.

Показано, что баротропная самодвижущаяся вихревая структура при взаимодействии с топографической преградой в неограниченной жидкости без фоновых потоков может совершать два типа движения. Первое, нелокализованная динамика, при которой диполь продолжает свое направленное движение после взаимодействия с топографической преградой, при этом траектория движения диполя может быть сильно изменена за счет взаимодействия с преградой. Второе - диполь начинает колебаться вокруг топографической преграды, при этом диполь периодически разрушается на два изолированных вихря, а потом снова

воссоединяется в самодвижущуюся структуру. Бароклинный самодвижущийся диполь (хетон) имеет аналогичные типы движения: локализованное и нелокализованное, но более сложное с хаотическими режимами.

Показано, что изолированный вихрь может быть захвачен округлой выемкой, при этом совершая в ней периодические колебания. При периодическом возмущении внешнего течения, движение вихря в окрестности выемки усложняется, начинают появляться нерегулярные траектории движения вихря.

Рассмотрена эффективность перехода к хаотическому движению жидких частиц в окрестности двух точечных вихрей произвольных интенсивностей, помещенных в линейный сдвиговый поток в баротропной жидкости на f -плоскости. В случае, если компоненты линейного сдвигового потока и внешнего вращения гармонически меняются с разными амплитудами, показана возможность параметрической неустойчивости, приводящей к смене типа движения

Анализируется совместное влияние детерминированной нерегулярной динамики и турбулентной диффузии. Показано, что нерегулярная детерминированная динамика усиливает поток жидких частиц из ядра вихря во внешнюю область, что способствует более быстрой потере завихренности вихревой структурой.

Показано, что при наличии вертикальной компоненты диффузии (которая на порядки слабее по сравнению с горизонтальными компонентами), ее влияние сравнимо с влиянием горизонтальных компонент, так как отношение коэффициента вертикальной диффузии к вертикальному линейному масштабу имеет тот же порядок, что и отношение коэффициента горизонтальной диффузии к горизонтальному линейному масштабу.

Диссертация написана ясным научным языком, форма изложения и аргументация убедительны, имеется строгий подход к обоснованию результатов и выводов. Можно выделить прекрасное и филигранное владение Е.А. Рыжовым равно, как сложными аналитическими, так и численными методами исследования. Особо следует отметить квалифицированные обзоры современного состояния освещаемой проблемы в каждой главе, демонстрирующие высокий уровень подготовки и эрудицию автора. Ряд замечаний был высказан выше. К сожалению, текст диссертации изобилует мелкими опечатками.

Изложенные выше замечания ни в коей степени не снижают большую научно-практическую ценность и значимость рассматриваемой диссертационной работы.

Оценивая работу в целом, отметим следующее. Диссертация Е.А. Рыжова является важным шагом в процессах исследования взаимодействия атмосферы и океана. Она выполнена на высоком научном уровне. Работа хорошо оформлена. - Автореферат соответствует содержанию диссертации. Опубликованные автором работы (34 статьи!) в ведущих научных журналах и широко представленные на российских и международных конференциях достаточно полно отражают материал, изложенный в диссертации.

На основании вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа Рыжова Е.А. «Динамика квази-геострофических вихрей при наличии сдвиговых потоков и топографических преград» является законченной научно-квалификационной работой, соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, и автору может быть присуждена степень доктора физико-математических наук по специальности 25.00.28 – Океанология.

Официальный оппонент:

Чхетиани Отто Гурамович

доктор физико-математических наук

шифр специальности оппонента – 01.04.02 «теоретическая физика»

Заместитель директора по науке\ Заведующий лабораторией геофизической гидродинамики

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение науки
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3

Рабочий телефон 8 (495) 951 84 80

E-mail: lgg@ifaran.ru

19 августа 2019 года

Подпись О.Г. Чхетиани заверяю

Ученый секретарь ИФА им. А.М. Обухова РАН

Канд. геогр. наук



/О.Г. Чхетиани/

/Л.Д. Краснокутская/

Я, Чхетиани Отто Гурамович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета и их дальнейшую обработку.