

На правах рукописи

СИНГАТУЛИН Ренат Маликович

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР  
В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ, ВКЛЮЧАЯ ПЛАЗМУ**

Специальности: 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Казань – 2004

Работа выполнена на кафедре электроснабжения промышленных предприятий  
Казанского государственного энергетического университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
В.Ю. Белашов

Научный консультант: доктор физико-математических наук  
С.В. Владимиров

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
А.Н. Фахрутдинова

доктор физико-математических наук  
С.И. Попель

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн РАН, г. Троицк  
Московской области

Защита состоится 23 декабря 2004 года в 14 часов 30 минут на заседании  
Диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном универси-  
тете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская,  
18, физический факультет, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Лобачев-  
ского Казанского государственного университета

Автореферат разослан \_\_\_\_ ноября 2004 года

Ученый секретарь Диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

А.В. Карпов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая работа посвящена численному исследованию вихревых областей конечной площади (ВОКП), которые представляют собой, в двумерном случае, связную конечную область однородной завихрённости, окружённую незавихрённой средой. Такие объекты интересны тем, что их изучение играет важную роль при моделировании атмосферных, гидродинамических вихрей, вихревых структур в замагниченной плазме, а также при исследовании общей динамики вихревых образований.

*Актуальность темы диссертации.* Исследования пространственно-временной эволюции, устойчивости, динамики взаимодействия и разрушения двумерных нелинейных образований вихревого типа в сплошных средах, включая атмосферу и гидросферу Земли, атмосферы других планет, а также плазму ионосферы и магнитосферы Земли, стали актуальными в последние два с половиной десятилетия в связи с открытием так называемых когерентных структур. В природе такие структуры существуют в виде атмосферных циклонов и антициклонов, рингов Гольфстрима, грибовидных и триполярных структур, синоптических вихрей в океане, вихрей Россби, дрейфовых вихрей в плазме и др. С начала 80-х годов когерентные вихри стали объектом усиленного изучения как в физике плазмы, так и в динамике геофизических непрерывных сред. Эти исследования были стимулированы открытием в 1979 г. Хасегавой и др. аналогии между уравнением Хасегавы-Мима, описывающим нелинейные дрейфовые волны (вихри) в замагниченной плазме, и уравнением баротропной завихрённости, которое в течение длительного времени использовалось для описания крупномасштабных вихревых течений в атмосфере и океане. В 1980 году В.И. Петвиашвили обобщил уравнение Хасегавы-Мима с учетом эффектов возмущения среды большой амплитуды в случае геофизических объектов и градиентов электронной температуры – в случае плазмы. При этом было установлено, что уравнения вихревого движения в атмосфере и плазме сводятся к одному уравнению, имеющему решение в виде двумерных круговых вихрей-антициклонов, перемещающихся в западном направлении, или солитонов-антициклонов, размер которых больше характерного размера дисперсии. Уникальность решения Петвиашвили заключается в том, что оно описывает плавный переход солитонов в вихри и показывает их общую природу.

Динамика вихрей составляет обширный раздел физики жидкости, газа и плазмы. Вихревые структуры участвуют в процессе турбулентного переноса, поэтому исследование общей динамики вихрей представляет непосредственный практический интерес. Часто в природе и в лабораторных установках (плазменных и гидродинамических) под влиянием определённых физических причин движение среды становится квазидвумерным. В атмосфере и океане такими

причинами являются вращение планеты (сила Кориолиса) и стратификация жидкости по плотности, в плазме – это магнитное поле (сила Лоренца). В двумерном случае для локальных вихревых образований характерно сохранение завихрённости внутри некоторой области, что сильно ограничивает возможность распада таких структур, поэтому устойчивые вихри становятся существенными элементами динамики среды, и их исследование является важной задачей как для построения общей вихревой теории, так и для отдельных разделов физики атмосферы, геофизической гидродинамики и физики плазмы (включая плазму ионосферы и магнитосферы), связанных с изучением разнообразных вихревых движений.

**Целью** работы является численное исследование пространственно-временной эволюции и динамики взаимодействия вихревых структур в атмосфере и гидросфере, а также в плазме.

**Решаемые задачи:**

- 1) исследование структуры, пространственно-временной эволюции и устойчивости уединенных вихревых областей относительно возмущений их формы;
- 2) изучение режимов взаимодействия ВОКП, вычисление параметров, определяющих устойчивость  $N$ -вихревой системы, с целью прогнозирования характера взаимодействия вихревых структур, численное исследование эволюции и динамики  $N$ -вихревых систем;
- 3) исследование динамики трехмерных вихревых структур в плоскостных средах (квазидвумерное приближение), изучение эволюции и взаимодействия 3D вихревых систем;
- 4) исследование динамики потоков заряженных частиц (заряженных нитей) в однородном магнитном поле;
- 5) приложение результатов исследований к изучению некоторых проблем вихревой динамики в атмосфере и гидросфере: моделирование эволюции тропических циклонов, торнадоподобных вихревых структур и вихрей в океане, а также образований вихревого типа в плазме: вихревых и спиральных структур в магнитосфере и ионосфере Земли и в пылевой плазме;
- 6) развитие метода контурной динамики с целью улучшения его точностных характеристик и обеспечения возможности численного интегрирования систем эйлерового типа и соответствующих интегродифференциальных уравнений на больших временных интервалах.

**Методологической и теоретической** базой исследований послужили работы Г. Лэмба, Дж. Сэффмана и В.И. Петвиашвили, в которых развиты основные положения теории вихревых движений и выполнено её обобщение для геофизических процессов и явлений в замагниченной плазме. При интерпретации полученных результатов мы опирались на работы М.А. Соколовского и В.Ф. Козлова. Метод компьютерного моделирования, использованный нами в

работе, представляет собой модификацию и обобщение метода контурной динамики (КД), развитого Н.Дж. Забуски, Д.И. Пуллином и Д.Ж. Дритчелом.

**Научная новизна** работы определяется следующими результатами:

1. Исследована динамика уединённых вихревых областей, впервые установлено, что для ВОКП эллиптической формы могут иметь место три типа эволюции, которые определяются значением эксцентриситета.

2. Впервые изучены режимы взаимодействия вихревых областей конечной площади и найдены параметры, определяющие режим взаимодействия и устойчивость вихревой системы, получен критерий устойчивости парного взаимодействия в  $N$ -вихревой системе, позволяющий осуществлять прогнозирование характера и результат взаимодействия ВОКП.

3. Исследовано взаимодействие многовихревых систем (в частности, трёх- и четырёхвихревых) симметричной начальной конфигурации, показано отличие во взаимодействии однополярных и разнополярных вихревых областей, в численных экспериментах впервые установлено, что взаимодействие разнополярных ВОКП происходит более интенсивно.

4. Впервые, в рамках квазидвумерного подхода, численно исследована структура, эволюция и динамика взаимодействия трехмерных вихревых образований в плоскостных средах. Показано, что характер взаимодействия в 3D вихревой системе определяется конфигурацией и полярностью «вихревых трубок», а его интенсивность наиболее высока в средних слоях.

5. Численно исследована динамика развития и взаимодействия поперечных возмущений заряженных нитей (потокосов заряженных частиц) в однородном магнитном поле. Впервые показано, что характер эволюции определяется амплитудой возмущения, количеством взаимодействующих нитей, плотностью их распределения и знаком заряда частиц.

6. Изучены приложения результатов к задачам исследования динамики некоторых типов вихревых систем в атмосфере, гидросфере и плазме: моделированию эволюции тропических циклонов, торнадоподобных вихревых образований, вихрей в океане, а также структур вихревого типа в магнитосфере и ионосфере Земли и в пылевой плазме.

7. Выполнена модификация метода КД, что позволило значительно улучшить его точностные характеристики и обеспечило возможность численного исследования эволюции и динамики взаимодействия 2D и 3D локальных вихревых возмущений в различных геофизических средах на значительных временных интервалах при существенной экономии времени счёта.

**Практическая ценность работы** определяется новыми результатами, уточняющими картину эволюции вихревых образований, возникающих в атмосфере, гидросфере и плазме, их взаимодействия и разрушения. Усовершенствованный метод контурной динамики и разработанные на его основе алгоритм и

компьютерная программа моделирования динамики вихревых структур являются эффективным средством исследования вихревых движений в сплошных средах, включая вопросы прогнозирования эволюции вихревых систем. Результаты, полученные в диссертации, используются в КГЭУ в работах по исследованию динамики неоднородных нелинейных структур солитонного и вихревого типов в сплошных средах и внедрены в лекционный курс «Математические методы моделирования физических процессов», читаемый в КГЭУ.

**Личный вклад автора.** Решение поставленных задач исследования эволюции и динамики взаимодействия вихревых структур, модификация метода и вычислительного алгоритма контурной динамики, проведение численных экспериментов, обработка, интерпретация и анализ полученных результатов.

**Апробация работы.** Результаты исследований были представлены и обсуждались на VII и VIII Научных конференциях аспирантов и молодых исследователей Северного международного университета (Магадан, 2000, 2001); III Международном симпозиуме по энергетике, окружающей среде и экономике РНС-ЭЭЭ (Казань, 10-14 сентября 2001); Республиканском конкурсе научных работ среди студентов и аспирантов на соискание премии им. Н.И. Лобачевского (Казань, 2002); Школе-семинаре акад. В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, 1-4 октября 2002); 11<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics (Sydney, Australia, July 15-19, 2002), 30<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (S.-Petersburg, Russia, July 7-11, 2003); Joint International Scientific Conference «New Geometry of Nature: Mathematics, Geophysics» (Kazan, August 25 - September 5, 2003); IV International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (Minsk, Belarus, September 15-19, 2003); Теоретическом семинаре научно-исследовательской лаборатории «Физика плазмы» ИОФАН (Москва, январь 2004); III Молодёжной научно-технической конференции «Будущее технической науки» (Н. Новгород, 26-27 мая 2004); Общегородском научном семинаре «Теория и компьютерное моделирование нелинейных и нестационарных процессов в физических средах» (Казань, КГЭУ, 2001-2004).

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований: гранты РФФИ № 01-02-16116, № 02-03-06172 (МАС), Академией наук Республики Татарстан: грант №02-2(Г).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 20 печатных работ, из них 3 статьи, 6 полных текстов докладов в сборниках трудов международных и всероссийских научных конференций и симпозиумов, 11 тезисов докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 122 страницы машинописного текста, 36 рисунков, 8 таблиц, 110 наименований использованной литературы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертации, проанализировано современное состояние проблемы, сформулированы цели и задачи исследования и обозначены подходы к их решению, приведены структура и содержание диссертации и указаны работы, в которых отражены основные результаты.

В *первой главе* рассмотрены основные уравнения, описывающие движение вихревых структур в жидкости и газе, осуществлён переход к переменным завихрённость-функция тока и обоснована его целесообразность для решения поставленных задач. Изложена модель двумерной замагниченной плазмы Тэйлора-Макнамары и продемонстрирована аналогия между гидродинамическими уравнениями и уравнениями, описывающими плазму в рамках данной модели. Таким образом, последовательно проводится идея универсальности основных уравнений динамики и инвариантности формы их решений для сред различных типов в рамках исходных предположений, формулируемых в работе.

Система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho = 0, \quad \mathbf{v} = -\frac{\hat{z} \times \nabla \psi}{B}, \quad \nabla^2 \psi - f = -\rho.$$

В зависимости от рассматриваемой среды, входящие в эту систему уравнений переменные, имеют различный физический смысл (табл. 1).

*Таблица 1*

Ф-ция	Жидкость, газ	Плазма
$\rho$	$z$ -компонента завихренности	линейная плотность заряда
$\psi$	функция тока	потенциал электрического поля
$B$	$B = 1$	модуль вектора магнитной индукции
$f$	$f = 0$	$f = 0$ – с кулоновским взаимодействием $f = k^2 \psi$ – с экранированным кулоновским взаимодействием

В работе рассмотрены случаи, когда  $f = 0$ , что соответствует вращению локальных вихревых образований в жидкости или эволюции потоков заряженных частиц в однородном магнитном поле.

Во *второй главе* представлен краткий обзор основных методов численного исследования вихревых структур, проведён сравнительный анализ и показаны преимущества и недостатки использования тех или иных подходов для решения задач моделирования локальных вихревых возмущений. Подробно описан метод контурной динамики, выполнена его модификация, позволяющая исключить некоторые погрешности «классического» метода КД, а также приведены результаты диагностики модифицированного метода контурной динамики, использовавшегося в работе при численном моделировании динамики вихревых структур, показано соответствие с результатами аналитических решений для модельных задач эволюции эллиптического вихря Кирхгофа.

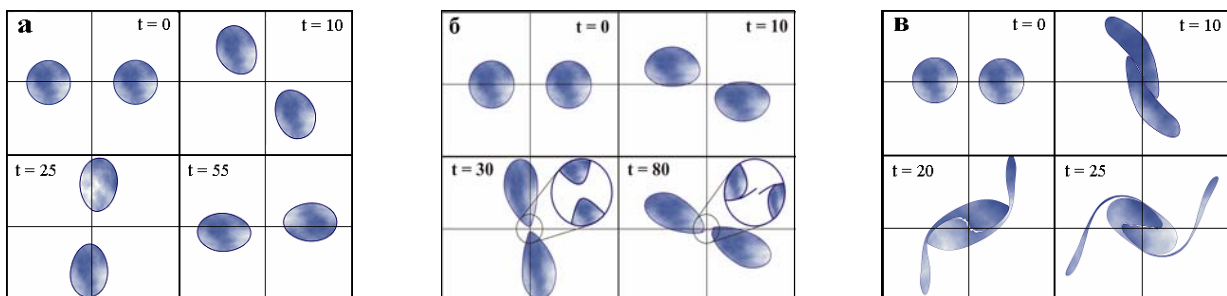
В *третьей главе* путём численного эксперимента проведены исследования динамики вихревых образований. Для уединённых ВОКП эллиптической формы установлено, что в зависимости от величины эксцентриситета  $e$ , могут иметь место три типа эволюции вихря: при  $e \leq 0.94$  – устойчивое вращение вокруг центра завихрённости, при  $0.94 < e \leq 0.98$  – деформация ВОКП в процессе эволюции с образованием нитей завихренности и вихревых пелен, в случае  $0.98 < e < 1$  – разрушение вихревой области с образованием мелкомасштабных вихревых структур и дальнейшей турбулизацией волнового поля.

Численное моделирование взаимодействия пары круговых вихрей с противоположными знаками завихрённости циклонического ( $\zeta < 0$ ) и антициклонического ( $\zeta > 0$ ) типов, которые являются предельными состояниями для сильно вытянутых дипольных структур, моделирующих ограниченные струйные течения, показало, что вихри движутся в одном направлении, перпендикулярном оси, соединяющей их центры. Направление и скорость движения вихревой пары зависят от знаков и величин завихренностей, а также от расстояния между центрами ВОКП.

Исследование динамики парного взаимодействия вихрей с одинаковыми знаками  $\zeta$  показало, что могут иметь место два режима взаимодействия:

1. При достаточно большом расстоянии между центрами вихревые области вращаются вокруг некоторого общего центра, при этом происходит деформация вихрей – они вытягиваются, принимая форму близкую к эллиптической, но со временем возвращаются к первоначальному состоянию – наблюдается явление «квазивозврата» (рис. 1а).

2. С уменьшением расстояния между центрами вихри начинают все больше деформироваться в процессе взаимодействия, что приводит к образованию точек заострения и вызывает появление нитей завихренности (см. рис. 1б). При дальнейшем уменьшении расстояния между центрами вихрей происходит их «фазовое перемешивание» (рис. 1в).



**Рис. 1.** Режимы парного взаимодействия вихрей антициклонического типа

Качественное изменение (своего рода «скачок») в характере взаимодействия двух вихревых областей происходит при переходе в состояние фазового перемешивания. Для прогнозирования характера вихревого взаимодействия была введена функция основных характеристик взаимодействующих вихревых обра-

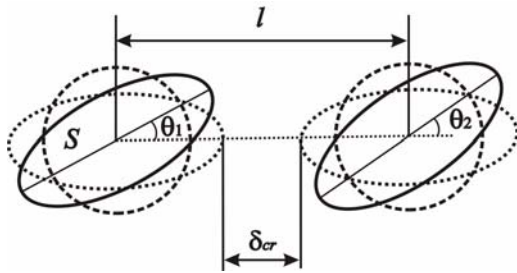


зований, отвечающих их состоянию при  $t = 0$ :

$$\xi = (S/l^2)(\zeta_1/\zeta_2)(1-e_0)^{-1}(1+\sin^2\theta),$$

где  $S$  – площадь ВОКП (предполагаем, для определённости, что площади взаимодействующих ВОКП  $S_1 = S_2 = S$ ),  $l$  – расстояние между их центрами,  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  – значения завихрённостей (причем  $\zeta_1 \geq \zeta_2$ ),  $e_0 = (e_1 + e_2)/2$  – усреднённый по двум ВОКП эксцентриситет и  $\theta = \theta_1 + \theta_2$  – сумма углов наклона больших осей эллипсов ВОКП относительно прямой, соединяющей их центры (рис. 2).

Вводя в качестве критических параметров функции  $\alpha = S/l^2$ ,  $\beta = \zeta_1/\zeta_2$ ,  $\gamma = (1-e_0)^{-1}$ ,  $\theta_0 = 1 + \sin^2\theta$  и варьируя соответствующие аргументы, в численных экспериментах для вихревых областей круговой и эллиптической формы удалось получить значения  $\alpha_{cr}$ ,  $\beta_{cr}$ ,  $\gamma_{cr}$  и  $\theta_{0cr}$ , при которых система переходит скачком в режим активного взаимодействия, отвечающего фазовому перемешиванию:  $\xi_{cr} = \alpha_{cr}\beta_{cr}\gamma_{cr}\theta_{0cr} = 0.267 \times 1.11 \times 7.143 \times 1.005 = 1.129$ .

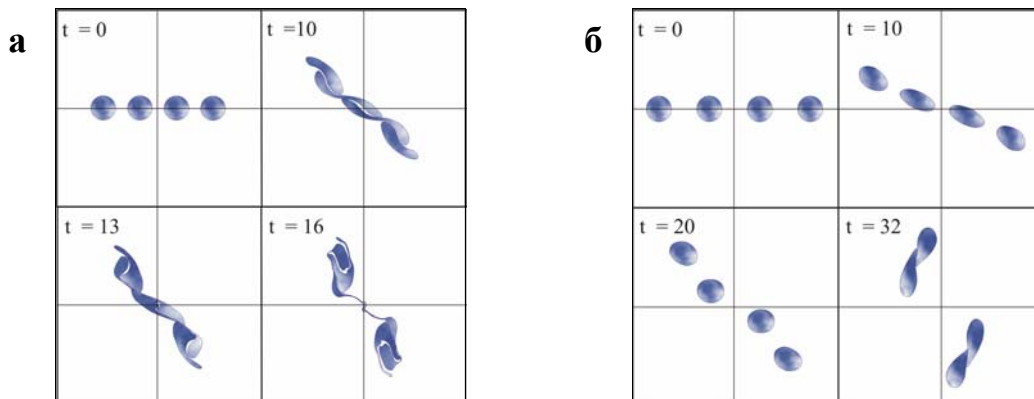


**Рис. 2.** Схема исходной конфигурации системы двух ВОКП

Сравнивая значение  $\xi$  для произвольной начальной конфигурации вихревой пары с критическим значением  $\xi_{cr}$ , можно прогнозировать результат взаимодействия вихревых областей: если  $\xi < \xi_{cr}$ , то фазового перемешивания ВОКП наблюдаться не будет, в против-

ном случае, когда  $\xi \geq \xi_{cr}$ , будет происходить их слияние с последующим образованием завихрённостей более мелкого масштаба.

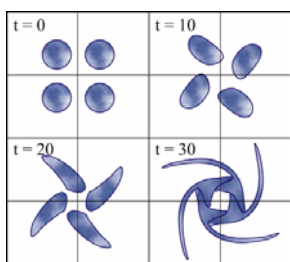
Для многовихревых систем также наблюдаются два режима взаимодействия: режим квазивозврата и режим фазового перемешивания. Численные эксперименты с четырьмя линейно расположенными вихрями показали, что для такой системы, наряду с 4-вихревым взаимодействием (рис. 3а), характерной особенностью является возможность попарного взаимодействия вихрей (рис. 3б).



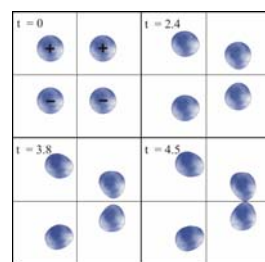
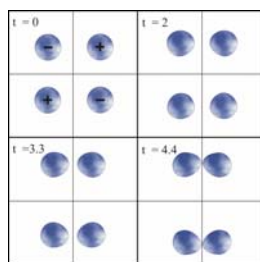
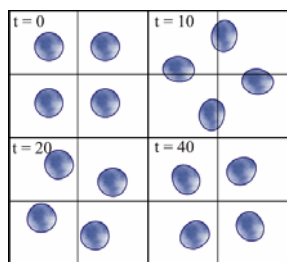
**Рис. 3.** Взаимодействие круговых вихрей диаметра  $d$  и  $\zeta = -1$  при  $\delta = d/2$  (а) и  $\delta = d$  (б)

Параметр  $\alpha_{cr}$  в этом случае разделяет режимы  $N$ -вихревого взаимодействия следующим образом. Для режима фазового перемешивания всей системы  $\alpha_{cr} = 0.227$ , для попарного взаимодействия значение параметра  $\alpha$  лежит в пределах  $0.155 < \alpha < 0.227$ , при  $\alpha \leq 0.155$  наблюдается режим квазивозврата.

Для структуры из четырёх вихрей, расположенных в вершинах квадрата, также было найдено критическое значение  $\alpha_{cr} = 0.315$ . Как показали численные эксперименты по исследованию эволюции вихрей с разными знаками завихрённости, взаимодействие разнополярных ВОКП (рис. 5) происходит интенсивнее, чем однополярных.

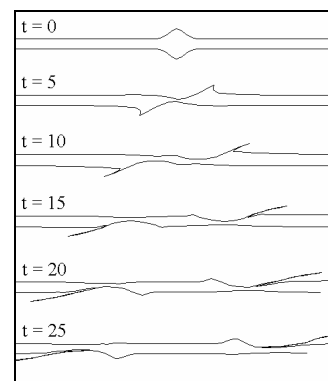
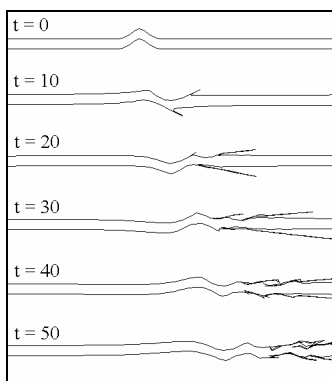
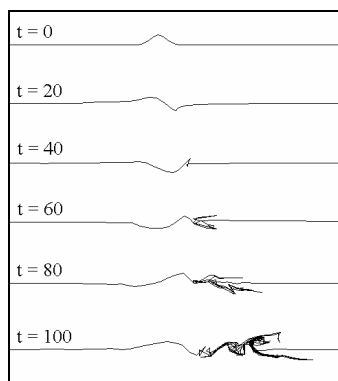


**Рис. 4.** Взаимодействие вихрей с  $\zeta = -1$  при  $\delta = d/2$  и  $\delta = d$



**Рис. 5.** Взаимодействие вихрей с  $\zeta = -1$  и  $\zeta = 1$

Исследование динамики заряженных нитей, которые представляют собой потоки заряженных частиц в однородном магнитном поле (двумерная модель плазмы Тэйлора-Макнамары), показало, что чем больше амплитуда возмущения, чем большее количество нитей участвует во взаимодействии и чем плотнее они расположены, тем быстрее и интенсивнее происходит образование структур вихревого типа (рис. 6).



**Рис. 6.** Динамика развития вихревых структур при поперечных возмущениях заряженных нитей

В *четвёртой главе* рассмотрены приложения полученных результатов к исследованию динамики вихревых образований в атмосфере, гидросфере и плазме. Исследование стационарных ВОКП в геофизической формулировке представляет собой важный класс задач динамики стационарных фронтов завихрённости. Результаты моделирования эволюции синоптического вихря циклонического типа, который можно рассматривать как фронт завихрённости, представлены на рис. 7 (слева). В численных экспериментах качественно вос-

произведены наблюдаемые на спутниковых изображениях (справа) деформации вихревого поля. Масштабные соотношения параметров модельных и некоторых реальных вихревых систем приведены в табл. 2.

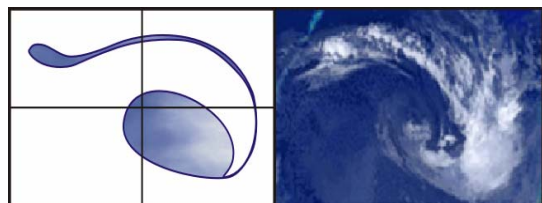


Рис. 7.

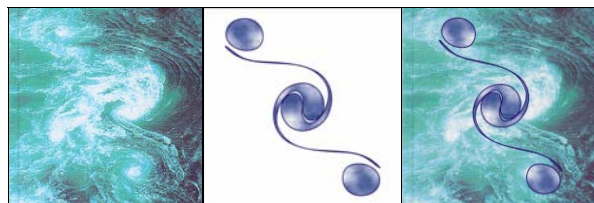


Рис. 8.

На рис. 8 представлены результаты моделирования четырёхвихревого взаимодействия, наблюдавшегося в канале Наруто (Япония). Сравнение результатов численного эксперимента с данными видеонаблюдений подтверждает их качественное совпадение.

Одной из стационарных конфигураций является пара симметричных ВОКП с завихрённостями противоположных знаков, представляющих собой предельные состояния для сильно вытянутых дипольных структур, моделирующих ограниченные струйные течения. Наблюдаемая при этом в численных экспериментах концентрация завихрённости в квазистационарной головной части имеет прямое отношение к формированию грибовидных течений в океане.

Исследование динамики трехмерных вихревых структур выполнялось в квазидвумерном приближении, справедливом в случае, когда вертикальной компонентой скорости частиц допустимо пренебречь, т.е. среда может рассматриваться как плоскостная. При этом, исходя из реальных физических условий, характерных для моделируемого объекта, в каждом слое 3D вихря задавалась величина завихрённости, а вертикальная его структура определялась физической постановкой задачи. На рис. 9 представлены результаты моделирования эволюции торнадо в рамках квазидвумерного подхода с использованием послойной аппроксимации вихревой структуры системой ВОКП. При этом исследовалось влияние возмущения, наложенного на ось торнадо, проходящую через центры завихрённости плоских слоев 3D объекта, на его динамику. В результате установлено, что малое поперечное возмущение приводит к незначительным колебаниям оси и, в целом, не влияет на структуру и устойчивость вихря. Численные эксперименты по динамике взаимодействия 3D вихревых структур позволили установить, что его характер определяется конфигурацией и полярностью «вихревых трубок», а его интенсивность наиболее высока в средних слоях. Результаты данного цикла исследований, с учетом соответствующих масштабных преобразований (см. табл. 2), показывают, что использование модифицированного метода КД дает возможность прогнозировать эволюцию торнадо и эффективно моделировать динамику взаимодействия вихрей подобного типа (рис. 10).

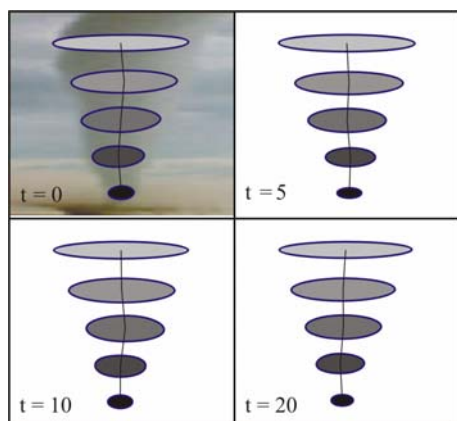


Рис. 9. Эволюция 3D-вихря

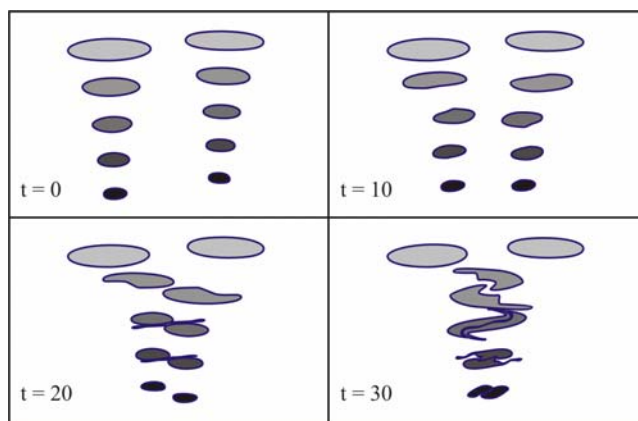


Рис. 10. Взаимодействие 3D-вихрей

Отметим, что данный подход также применим к исследованию динамики воронкообразных вихрей в жидкости.

Таблица 2

Параметр	Модельные значения	Торнадо	Тропические циклоны	Океанические вихри
$R$	1	$10^2$ м	$10^5$ м	$2.5 \times 10^4$ м
$V$	1	100 м/с	10 м/с	2.5 м/с
$\xi$	1	$1 \text{ с}^{-1}$	$10^{-4} \text{ с}^{-1}$	$10^{-4} \text{ с}^{-1}$
$T$	$2\pi$	$2\pi \text{ с}$	$2\pi \times 10^4 \text{ с}$	$2\pi \times 10^4 \text{ с}$

Численное исследование взаимодействия частиц в пылевой плазме с вихревыми структурами большего масштаба показало, что при отсутствии вращения самих пылевых частиц взаимодействие является слабым и практически не проявляется, с появлением у частиц ненулевой завихренности взаимодействие становится заметным, и частицы вовлекаются в вихревое движение (рис. 11).

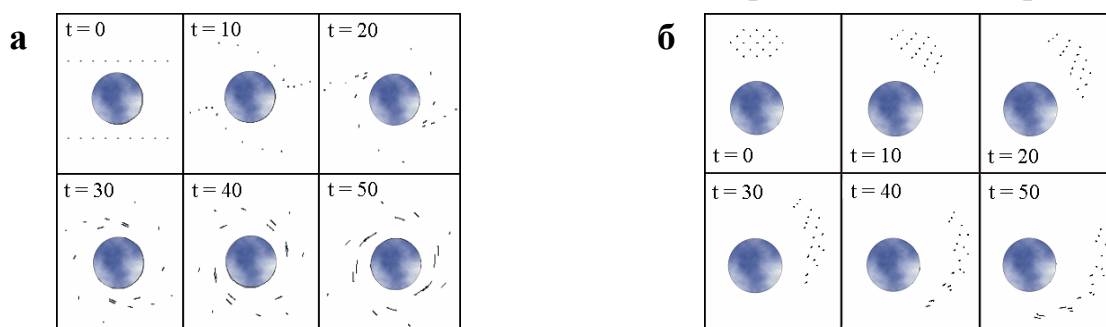


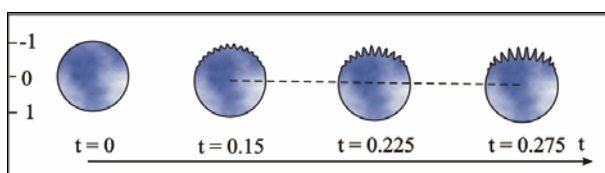
Рис. 11. Взаимодействие пылевых частиц с вихрем:

а – линейные пылевые слои; б – пылевое облако

Исследование динамики заряженных нитей в однородном магнитном поле в приложении к процессам в магнитосфере и ионосфере Земли выполнялось с целью изучения влияния возмущений, имеющих различную физическую природу (солнечная активность, магнитные бури, приводящие к нарушению конфигурации (деформации) силовых магнитных линий в области полярного каспа и др.), на распространение потоков заряженных частиц. В результате установлено, что поперечные возмущения скорости потока приводят к его переходу в

неустойчивое состояние с образованием складок и сложных вихревых структур.

Отдельный цикл исследований был посвящен изучению структуры и эволюции плазменных облаков в ионосфере, образующихся в процессе солнечной ионизации искусственно инжектированного бария в ракетных экспериментах на высотах F-области. В численных экспериментах было установлено, что такие плазменные образования, приводящие к формированию вытянутых вдоль магнитного поля электронно-ионных неоднородностей (преимущественно столкновительная плазма с малым  $\beta = 4\pi nT / B^2$ ) диффундируя в процессе эволюции в направлении, перпендикулярном  $\mathbf{B}$ , приобретают в поперечном сечении нерегулярную полосчатую структуру (рис. 12).



**Рис. 12.** Эволюция искусственной электронно-ионной неоднородности (поперечное сечение)

Такие плазменные образования, являясь, с одной стороны, индикаторами состояния ионосферы, способствуют развитию нелинейности в F-слое и могут приводить к рассеянию и затуханию радиоволн КВ-УКВ-диапазона.

В **заключении** приводится перечень основных результатов, полученных в диссертации, и их обсуждение.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Численные эксперименты по исследованию динамики уединённых вихревых областей позволили установить, что для ВОКП эллиптической формы в зависимости от величины эксцентриситета могут иметь место три типа эволюции: при  $e \leq 0.94$  – устойчивое вращение вокруг центра завихрённости, при  $0.94 < e \leq 0.98$  – деформация ВОКП в процессе эволюции с образованием нитей завихрённости и вихревых пелен, в случае  $0.98 < e < 1$  – разрушение вихревой области с образованием мелкомасштабных вихревых структур и дальнейшей турбулизацией волнового поля.

2. Исследование структуры, эволюции и динамики взаимодействия  $N$ -вихревых систем позволило установить, что в таких системах могут иметь место два режима взаимодействия ВОКП. При этом показано, что реализация того или иного режима определяется параметрами системы: величиной завихрённости, расстояниями между центрами вихрей, формой и площадью ВОКП, конфигурацией их взаимного расположения. На основе результатов численных экспериментов получен критерий устойчивости парного взаимодействия в  $N$ -вихревой системе, позволяющий осуществлять прогнозирование характера и результат взаимодействия ВОКП. Показано отличие во взаимодействии однополярных и разнополярных вихревых областей и установлено, что взаимодей-



ствие разнополярных ВОКП происходит более интенсивно.

3. На основе исследований динамики трехмерных вихревых структур в плоскостойких средах в рамках квазидвумерного подхода установлено, что малое поперечное возмущение торнадоподобных вихрей приводит к незначительным колебаниям их оси и, в целом, не влияет на структуру вихря. Показано, что характер взаимодействия в 3D вихревой системе определяется конфигурацией и полярностью «вихревых трубок», а его интенсивность наиболее высока в средних слоях.

4. Численное исследование эволюции и динамики взаимодействия заряженных нитей (потоков заряженных частиц) в однородном магнитном поле показало, что характер эволюции определяется амплитудой поперечных возмущений, количеством взаимодействующих нитей, плотностью их распределения и знаком заряда частиц. Результаты имеют непосредственное приложение к физике магнитосферы и авроральной области ионосферы Земли.

5. В численных исследованиях структуры и эволюции плазменных облаков в F-области ионосферы установлено, что они, диффундируя со временем в направлении, перпендикулярном  $\mathbf{B}$ , приобретают в поперечном сечении нерегулярную полосчатую структуру, что, в свою очередь, может способствовать развитию нелинейности в F-слое и приводить к рассеянию и затуханию радиоволн КВ-УКВ-диапазона.

6. Выполнена модификация метода КД, что позволило значительно улучшить его точностные характеристики и обеспечило возможность численного исследования эволюции и динамики взаимодействия 2D и 3D локальных вихревых возмущений в атмосфере, гидросфере и замагниченной плазме на значительных временных интервалах при существенной экономии времени счёта.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах (приведены в хронологическом порядке):

1. Сингатулин Р.М. Стационарные  $V$ -состояния, их взаимодействие, возврат и разрушение//Идеи, гипотезы, поиск...: Сб. статей по материалам VII науч. конф. аспирантов и молодых исследователей Северного международного университета. Магадан: Изд. СМУ, 2000. – С. 16-17.

2. Сингатулин Р.М. Численное моделирование эволюции вихревых структур с разными порядками симметрии//Идеи, гипотезы, поиск...: Сб. статей по материалам VIII науч. конф. аспирантов и молодых исследователей Северного международного университета. Магадан: Изд. СМУ, 2001. – С. 12-16.

3. Сингатулин Р.М. Применение метода контурной динамики к явлениям, описываемым уравнениями эйлерового типа//II Межвузовская научно-практич. студ. конф. 17-18 апреля 2001 г. Тезисы докладов. Магадан: Изд. СМУ, 2001. С. 98-100.

4. Белашов В.Ю., Сингатулин Р.М. Моделирование эволюции вихревых структур в рабочих камерах энергетических установок//Тр. III Межд. симп. по энергетике, окружающей среде и экономике РНС-ЭЭЭ, Казань, 10-14 сентября

2001 г. Т. 2. Казань: КГЭУ, 2001. – С. 260-263.

5. Белашов В.Ю., Сингатулин Р.М. Компьютерное моделирование эволюции вихревых структур в сплошных средах//Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2001. № 9-10. С. 103-109.

6. Белашов В.Ю., Сингатулин Р.М. Численное исследование эволюции  $V$ -состояний в сплошных средах//IV Научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов РТ, Казань, 11-12 декабря 2001 г. Тезисы докладов. Кн. 3. Физико-математическое и техническое направление. Казань: Изд-во «Мастер Лайн», 2001. – С. 41.

7. Сингатулин Р.М. Численное исследование динамики вихревых структур//Республиканский конкурс научных работ среди студентов и аспирантов на соискание премии им. Н.И. Лобачевского, Казань, 2002 г. Сб. тезисов итоговой конференции. Т. II. Казань: КГУ, 2002. – С. 106-107.

8. Белашов В.Ю., Сингатулин Р.М. Исследование влияния конфигурации вихревых структур на их взаимодействие//Гр. Школы-семинара акад. В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань, 1-4 октября 2002 г. Казань: КГЭУ, 2002. – С. 50-52.

9. Belashov V.Yu., Singatulin R.M. Dynamics of Vortex Type Wave Structures in Plasmas and Fluids//11<sup>th</sup> Intern. Congress on Plasma Physics, July 15-19, 2002, Sydney, Australia. P. 107.

10. Белашов В.Ю., Сингатулин Р.М. Алгоритм метода контурной динамики и моделирование вихревых структур. Деп. в ВИНТИ № 272-В2003. Казань: КГЭУ, 2003. – 39 с.

11. Belashov V.Yu., Singatulin R.M. Dynamics of Vortex Type Wave Structures in Plasmas and Fluids//Proc. of 11th Intern. Congress on Plasma Physics. American Institute of Physics (AIP). Conference Proceedings, 2003. Pp. 609-612.

12. Belashov V.Yu., Singatulin R.M. Dynamics of the Vortex Structures' Interaction in Dependence on Their Symmetry Order and Geometry of the System. New Geometry of Nature. Mathematics, Mechanics, Geophysics, Astronomy & Biology. Joint Intern. Sci. Conf., Aug. 25 – Sept. 5, 2003. Kazan State University, Russia. V.1. Pp. 45-50.

13. Belashov V.Yu., Singatulin R.M. Dynamics of Vortex Type Wave Structures in Plasmas and Fluids//30th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, 7-11 July, St. Petersburg, 2003. ECA. Vol. 27A. P-2.200.

14. Belashov V.Yu., Singatulin R.M. Application of CD-Algorithm to Study of Vortices in Plasmas and Fluids//IV Intern. Conf. "Plasma Physics and Plasma Technology – PPPT-4", Sept. 15-19 2003, Minsk, Belarus, 2003. Pp. 892-895.

15. Белашов В.Ю., Сингатулин Р.М. О критических параметрах взаимодействия вихревых структур. Деп. в ВИНТИ № 496-В2004. Казань: КГЭУ, 2004. – 22 с.

16. Сингатулин Р.М. Нелинейная динамика вихревых структур в жидкости и плазме//III молодёжная научн.-техн. конф. «Будущее технической науки», Н.Новгород, 26-27 мая 2004 г. Тезисы докладов. Н.Новгород: ННГТУ, 2004. – С. 275.

---

Изд. лиц. № 00743 от 28.08.2000

Подписано к печати

Гарнитура «Times»

Физ. печ. л. 1.0

Тираж 100 экз.

10.11.2004

Вид печати РОМ

Усл. печ. л. 0.94

Заказ № 2298

Формат 60×84/16

Бумага «Business»

Уч.-изд. л. 1.0

---

Типография КГЭУ  
420066, Казань, Красносельская, 51