

На правах рукописи

Мингалев Игорь Викторович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЩЕЙ
ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕР ЗЕМЛИ,
ВЕНЕРЫ И ТИТАНА, А ТАКЖЕ
ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ЦИКЛОНОВ
В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Апатиты — 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении Полярном геофизическом институте Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Бисикало Дмитрий Валерьевич
доктор физико-математических наук, член-корр. РАН,
Институт астрономии РАН, заместитель директора

Чернин Артур Давидович
доктор физико-математических наук,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова, главный научный сотрудник

Орлов Юрий Николаевич
доктор физико-математических наук,
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
заведующий отделом


Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Институт космических исследований Российской академии наук

Защита состоится 17 марта 2016 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.03 при Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН по адресу: 125047, Москва, Миусская площадь, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и на сайте <http://keldysh.ru/council/3/>

Автореферат разослан " _____ " _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук  М.А. Корнилина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Данная диссертационная работа посвящена численному моделированию общей циркуляции атмосфер Венеры, Титана и Земли и моделированию процессов формирования циклонических вихрей в тропосфере Земли в приэкваториальной области, а также созданию моделей общей циркуляции атмосфер Земли, Венеры и Титана, основанных на численном интегрировании полных уравнений газовой динамики на пространственной сетке с высоким разрешением.

Актуальность проблемы

За последние два десятилетия произошел качественный скачок в развитии вычислительной техники. В частности, исследователям стали доступны компьютеры с архитектурой, позволяющей проводить массивно-параллельные вычисления. Методы численного решения системы уравнений газовой динамики также получили большое развитие за последние два десятилетия. В настоящий момент при использовании мощного персонального компьютера доступно интегрирование уравнений газовой динамики с приемлемым быстродействием на пространственной сетке, содержащей 10^8 узлов, а при использовании средних суперкомпьютеров со смешанной архитектурой число узлов сетки можно увеличить до 10^9 . В то же время методика построения моделей общей циркуляции планетных атмосфер, основанных на численном интегрировании уравнений газовой динамики, мало освещена в монографиях и научных публикациях.

В атмосфере Земли и атмосферах Венеры и Титана протекают различные взаимосвязанные динамические процессы, причем пространственные и временные масштабы протекания одного процесса могут отличаться от соответствующих масштабов другого процесса на 2–3 порядка. Например, в нижней атмосфере Земли регулярно возникают горизонтальные сдвиговые течения протяженностью более 1500 км, в которых характерные пространственные масштабы изменения гидродинамической скорости не превышают 100 км, что на порядок меньше, чем требуется при выводе системы уравнений геофизической гидродинамики.

Упомянутые выше горизонтальные сдвиговые течения регулярно возникают, в частности, между ячейками циркуляции Хедли, Ферреля и приполюсными ячейками, а также на границах циклонов и антициклонов. Эти сдвиговые течения могут существовать на протяжении временного интервала от нескольких часов до нескольких суток. В атмосфере Венеры в полярных областях в интервале высот 60–80 км существуют вихри, в которых характерный масштаб изменения скорости ветра составляет примерно 100–150 км. Кроме того, наблюдаются сильная зональная суперротация атмосферы Венеры в интервале высот 40–75 км и большие скорости ветра на высотах выше 80 км. Для изучения указанных динамических процессов необходимы модели общей циркуляции атмосфер Земли, Венеры и Титана, основанные на численном интегрировании полных уравнений газовой динамики на пространственной сетке с горизонтальным разрешением лучше 1° , а для моделирования процессов образования циклонов в земной тропосфере необходимо разрешение менее 0.2° .

Численное моделирование динамики атмосфер Земли, Титана, Венеры и других планет применяется для исследований в течение последних 45 лет. До недавнего времени большинство моделей общей циркуляции атмосферы Земли и все модели общей циркуляции атмосфер Венеры и Титана были основаны на решении системы уравнений геофизической гидродинамики. В этой системе уравнение для вертикальной компоненты скорости заменено уравнением гидростатики. Вывод этой системы уравнений проводится в предположении, что характерные масштабы для Земли и Венеры, на которых меняется гидродинамическая скорость, в вертикальном и горизонтальном направлениях составляют 10 км и 1000 км соответственно. Эта система уравнений описывает эволюцию параметров атмосферного газа, осредненных по указанным пространственным масштабам, и не описывает правильно динамические процессы, у которых характерные масштабы изменения скорости ветра по горизонту не превышают 300 км, и которые представляют большой интерес, например, волны, возникающие в атмосферах Земли и Венеры при обтекании горных систем горизонтальным течением атмосферного газа,

а также процессы развития неустойчивости в узких сдвиговых течениях, которые регулярно происходят в атмосфере Земли. Модели, основанные на численном интегрировании уравнений геофизической гидродинамики, использовались и используются для моделирования эволюции климатических параметров и для прогноза погоды. За последнее десятилетие появились негидростатические модели общей и региональной циркуляции атмосферы Земли, которые, как и их гидростатические предшественницы, предназначены для моделирования эволюции климатических параметров и для прогноза погоды.

Данная диссертация является шагом в направлении создания моделей общей циркуляции атмосфер Земли, Венеры и Титана, основанных на численном интегрировании полных уравнений газовой динамики на пространственной сетке с высоким разрешением и максимально использующих возможности современных и перспективных компьютеров по организации массивно-параллельных вычислений. Такие модели позволяют исследовать многие важные и неизученные динамические процессы в атмосферах Земли, Венеры и Титана с помощью численного моделирования. Под руководством автора были созданы модели общей циркуляции атмосфер Земли, Венеры и Титана и региональная модель циркуляции земной тропосферы, основанные на численном решении полной системы уравнений движения вязкого сжимаемого газа без каких-либо упрощений на регулярной пространственной сетке с высоким разрешением. В модели общей циркуляции атмосферы Земли и в региональной модели учитываются фазовые переходы водяного пара в микрокапли воды и частицы льда и оседание этих аэрозольных капель и частиц льда в поле силы тяжести.

Цели и задачи данной работы

Целью данной работы является построение моделей общей циркуляции атмосфер Венеры, Титана и Земли и их применение для исследования общей циркуляции атмосфер и процессов формирования циклонических вихрей в приэкваториальной области тропосферы Земли. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изложить общую методику построения моделей общей циркуляции планетных атмосфер, основанных на численном интегрировании уравнений газовой динамики.
2. Изложить новые варианты явной гибридной разностной схемы для численного решения системы уравнений газовой динамики на регулярных 3-мерных пространственных сетках в декартовых и в сферических координатах с учетом и без учета источниковых членов, содержащих ускорение внешних массовых сил.
3. Изложить систему уравнений, предназначенную для описания динамики смеси воздуха, водяного пара и аэрозолей из микрокапель воды и микрочастиц льда с учетом фазовых переходов между различными состояниями воды, и изложить методику численного интегрирования этой системы, использующую указанную выше явную гибридную схему.
4. Изложить основные моменты программной реализации рассматриваемых моделей общей циркуляции планетных атмосфер на графических процессорах последних моделей с использованием технологии CUDA.
5. Создать основанную на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики модель общей циркуляции атмосферы Венеры, в которой учитывается рельеф поверхности Венеры и используется равномерная сетка в связанной с центром Венеры сферической системе координат с шагом сетки по вертикали 250 м и шагами сетки по горизонтальным направлениям менее 1° , а также используются параллельные вычисления на многопроцессорных компьютерах с общей памятью и на графических ускорителях компании NVIDIA.
6. При помощи упомянутой выше модели провести численное моделирование процесса установления общей циркуляции атмосферы Венеры при различных начальных условиях и при различных вариантах упрощенного способа расчета нагрева–охлаждения атмосферы за счет поглощения–испускания электромагнитного излучения, а

также исследовать такие особенности общей циркуляции атмосферы Венеры, как зональную суперротацию на высотах менее 80 км, изменение типа горизонтальной циркуляции на высотах 80–95 км от зональной суперротации к циркуляции с преобладанием переноса атмосферного газа из центра дневной стороны на центр ночной стороны через области средних широт и через полярные шапки, а также наличие вблизи полюсов нисходящих воронкообразных течений на высотах 70–80 км, которые известны из наблюдений, и исследовать влияние рельефа на общую циркуляцию атмосферы Венеры.

7. Создать основанную на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики модель общей циркуляции атмосферы Титана, в которой учитывается рельеф поверхности Титана и используется равномерная сетка в связанной с центром Титана сферической системе координат с шагом сетки по вертикали 1 км и шагами сетки по горизонтальным направлениям менее 1° , а также используются параллельные вычисления на многопроцессорных компьютерах с общей памятью и на графических ускорителях компании NVIDIA.
8. При помощи упомянутой выше модели провести численное моделирование процесса изменения общей циркуляции атмосферы Титана при смене сезонов от весеннего равноденствия до середины лета в северном полушарии.
9. Создать модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли, основанную на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики на пространственной сетке с горизонтальным разрешением лучше 0.5° и разрешением по высоте 200 м, причем такую, что в модели предусмотрена вставка области, в которой шаг сетки по горизонтальным направлениям в 4 или в 8 раз меньше, чем в остальной области моделирования, а также учитываются рельеф земной поверхности и наличие аэрозолей из воды и льда, фазовых переходов водяного пара в аэрозольные частицы

и обратно и используются массивно-параллельные вычисления на нескольких графических ускорителях.

10. При помощи упомянутой выше модели провести численное моделирование общей циркуляции атмосферы Земли с целью выяснить возможности модели воспроизводить возникновение и эволюцию сдвиговых течений в земной тропосфере, а также развитие неустойчивостей в этих течениях.
11. Создать модель, предназначенную для получения установившихся численных решений уравнений движения атмосферы при стационарном заданном по эмпирической модели NRLMSISE-00 распределении температуры воздуха.
12. Получить с помощью упомянутой выше модели модельные установившиеся циркуляции при стационарном распределении температуры воздуха, заданном по эмпирической модели NRLMSISE-00 при двух уровнях солнечной активности для условий, когда в Северном полушарии зима, и для условий, когда в Северном полушарии лето.
13. Создать региональную модель циркуляции нижней атмосферы Земли, основанную на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики на пространственной сетке с горизонтальным разрешением лучше 0.1° и разрешением по высоте 200 м, причем такую, что в модели учитывается наличие аэрозолей из воды и льда и фазовых переходов водяного пара в аэрозольные частицы и обратно и используются массивно-параллельные вычисления на нескольких графических ускорителях.
14. Провести с помощью упомянутой выше модели численное моделирование динамики тропосферы в приэкваториальной области, где расположена внутритропическая зона конвергенции, при наличии в начальный момент возмущений в виде искривленных участков центрального сдвигового течения внутритропической зоны конвергенции, имеющих длину 800–2000 км и отклоняющихся от остальной части этого течения на север или на юг на 100–200 км. Иссле-

довать процесс развития указанных выше возмущений и выявить закономерности в движении циклонических вихрей, возникающих в результате этого процесса.

Методы исследования

Основным методом исследования является метод математического моделирования, который включает в себя следующие этапы: теоретический анализ численных методов, численное моделирование общей циркуляции атмосфер Земли, Венеры и Титана, а также анализ результатов численного моделирования и сравнение этих результатов с данными наблюдений. Используемые в диссертации модели реализованы в виде комплексов программ на языке Fortran.

Научная новизна

1. Впервые детально изложена общая методика построения моделей общей циркуляции планетных атмосфер, основанных на численном интегрировании уравнений газовой динамики.
2. Представлены новые варианты явной гибридной разностной схемы для численного решения системы уравнений газовой динамики на регулярных 3-мерных пространственных сетках в декартовых и в сферических координатах с учетом и без учета источниковых членов, содержащих ускорение внешних массовых сил.
3. Представлена новая методика численного интегрирования системы уравнений динамики смеси воздуха, водяного пара и аэрозолей из микрокапель воды и микрочастиц льда с учетом фазовых переходов между различными агрегатными состояниями воды, использующая упомянутую выше явную гибридную схему.
4. Впервые создана основанная на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики модель общей циркуляции атмосферы Венеры, в которой учитывается рельеф поверхности Венеры и используется равномерная сетка в связанной с центром Венеры сферической системе координат с шагом сетки по вертикали 200 м и шагами сетки по горизонтальным направлениям менее

1°, а также используются параллельные вычисления на многопроцессорных компьютерах с общей памятью и на графических ускорителях компании NVIDIA.

5. Впервые в мировой практике при моделировании удалось получить одновременно такие особенности общей циркуляции атмосферы Венеры, как зональную суперротацию на высотах менее 80 км, изменение типа горизонтальной циркуляции на высотах 80–95 км от зональной суперротации к циркуляции с преобладанием переноса атмосферного газа из центра дневной стороны на центр ночной стороны через области средних широт и через полярные шапки, а также наличие вблизи полюсов нисходящих воронкообразных течений на высотах 60–80 км, которые известны из наблюдений.
6. Впервые в мировой практике исследовано влияние рельефа на общую циркуляцию атмосферы Венеры с использованием полной системы уравнений газовой динамики и показано, что из-за обтекания рельефа зональным потоком атмосферного газа генерируются подветренные волны, которые, распространяясь вверх, становятся источником возмущений для формирования выше слоя зональной суперротации системы волн, усиливающих вертикальный перенос и обнаруженных при помощи наблюдений.
7. Впервые создана основанная на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики модель общей циркуляции атмосферы Титана, в которой учитывается рельеф поверхности Титана и используется равномерная сетка в связанной с центром Титана сферической системе координат с шагом сетки по вертикали 1 км и шагами сетки по горизонтальным направлениям менее 1°, а также используются параллельные вычисления на многопроцессорных компьютерах с общей памятью и на графических ускорителях компании NVIDIA.
8. Впервые при помощи упомянутой выше модели проведено численное моделирование процесса изменения общей циркуляции атмосферы Титана при смене сезонов от весеннего равноденствия до

середины лета в северном полушарии.

9. Впервые проведено численное моделирование процесса развития неустойчивости сдвигового течения внутритропической зоны конвергенции при наличии возмущений в виде искривленных участков этого течения. Этот процесс приводит к распаду этого сдвигового течения и образованию циклонических вихрей в районе внутритропической зоны конвергенции.

Достоверность результатов

Достоверность результатов определяется корректностью применения уравнений газовой динамики, высокой точностью применяемых численных методов, которая подтверждена результатами тестовых расчетов, а также согласием между результатами численного моделирования и данными наблюдений.

Научная и практическая ценность

Научную ценность представляют общая методика построения моделей общей циркуляции планетных атмосфер, основанных на численном интегрировании уравнений газовой динамики, новые варианты явной гибридной разностной схемы для численного интегрирования системы уравнений газовой динамики, новая методика численного интегрирования системы уравнений динамики смеси воздуха, водяного пара и аэрозолей из микрокапель воды и микрочастиц льда с учетом фазовых переходов между различными агрегатными состояниями воды, использующая упомянутую выше явную гибридную схему. Также научную ценность представляют выявленные с помощью моделирования закономерности общей циркуляции атмосфер Земли, Венеры и Титана и механизм образования циклонических вихрей в районе внутритропической зоны конвергенции.

Практическую ценность представляют созданные программные реализации моделей, в которых используются параллельные вычисления на графических ускорителях, и результаты численного моделирования общей циркуляции атмосфер Венеры и Титана, которые позволяют лучше интерпретировать данные наблюдений и могут быть использованы

при планировании научных исследований для новых полетов к Венере и Титану автоматических космических аппаратов. Также практическую ценность представляет изложенный в данной диссертации метод прогноза образования циклонических вихрей в районе внутритропической зоны конвергенции.

Положения, выносимые на защиту

1. Впервые созданы варианты явной консервативной монотонной гибридной разностной схемы для численного интегрирования системы уравнений газовой динамики с учетом ускорения внешних массовых сил, которая описывает динамику планетных атмосфер. Эти варианты обеспечивают 2-й порядок точности и отсутствие нефизического разогрева или выхолаживания атмосферы при проведении расчетов на сколь угодно большом промежутке времени. Впервые построена система уравнений, описывающая динамику смеси воздуха, водяного пара и аэрозолей из микрокапель воды и микрочастиц льда с учетом фазовых переходов между различными состояниями воды, а также создана методика численного интегрирования этой системы, использующая построенную в этой работе явную гибридную схему.
2. Впервые созданы программные реализации моделей общей циркуляции атмосфер Земли, Венеры и Титана с учетом рельефа поверхности, основанных на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики со 2-м порядком точности, причем в моделях используются пространственные сетки с высоким разрешением, а также параллельные вычисления на нескольких графических процессорах одновременно.
3. Впервые с помощью моделирования в рамках полной системы уравнений газовой динамики исследованы и объяснены важные закономерности общей циркуляции атмосферы Венеры, а также изучено влияние рельефа на эту циркуляцию. Впервые показано, что внутренние гравитационные волны, наблюдаемые в атмосфере Венеры над облачным слоем, возникают из-за генерации горных подвет-

ренных волн при обтекании рельефа поверхности зональным течением. Установлено, что эти подветренные волны являются причиной формирования в средней и верхней атмосфере системы волн, усиливающих вертикальный перенос. Впервые с помощью численного моделирования в рамках полной системы уравнений газовой динамики эволюции общей циркуляции атмосферы Титана при смене сезонов получены четыре важных закономерности этой циркуляции, изложенные далее в заключении, и изучено влияние рельефа на эту циркуляцию.

4. Впервые исследовано влияние солнечной активности на крупномасштабную циркуляцию стратосферы и мезосферы Земли. Впервые проведено численное моделирование развития неустойчивости сдвигового течения во внутритропической зоне конвергенции и показано, что в случае, когда в этом течении имеется достаточно большой горизонтальный градиент горизонтальной составляющей ветра, появление искривленных участков этого течения приводит к развитию гидродинамической неустойчивости и распаду этого течения с образованием за 40–70 часов крупномасштабных циклонических вихрей диаметром 800–1200 км. Впервые установлен физический механизм образования крупномасштабных циклонических вихрей в районе внутритропической зоны конвергенции и обоснована методика прогноза их образования.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты получены под руководством и при непосредственном участии автора. Публикации, отражающие содержание диссертации, в большей части написаны в соавторстве с сотрудниками Полярного геофизического института, Института космических исследований и Института прикладной математики им. М.В. Келдыша. При подготовке этих публикаций автор участвовал в определении цели работ, выполнял постановки задач и разрабатывал численные методы, участвовал в написании и отладке программ, проведении расчетов, визуализации и анализе результатов моделирования и их сравнении

с данными наблюдений, формулировке выводов.

Апробация работы

Представленные в работе результаты докладывались на международных конференциях: European Planetary Science Congress (2009, 2010, 2011, 2012, 2013 и 2014 гг.), COSPAR Scientific Assembly (2010, 2012 и 2014 гг.), Fifth Moscow Solar System Symposium (Москва, 2014), а также на всероссийских конференциях: "Компьютерное моделирование актуальных задач крупного масштаба" (Таруса, Россия, 2010), "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (Москва, Россия, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 и 2015 гг.), "Высокоширотные гелиогеофизические явления" памяти Е. А. Пономарева (Иркутск, Россия, 2009), "Солнечно-земная физика" (Иркутск, Россия, 2010), "Экологические проблемы северных регионов и пути их решения" (Апатиты, Россия, 2010, 2011, 2012, 2013 и 2014 гг.), "Природа шельфа и архипелагов европейской Арктики" (Мурманск, Россия, 2008), Всероссийский ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений" (2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 и 2015 гг., Апатиты).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы более чем в 60 публикациях, в том числе в 21 научных работах в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях из перечня ВАК, а также более чем в 20 статьях в сборниках трудов научных конференций.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 119 наименований. Она содержит 187 страниц машинописного текста, включая 86 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *введении* обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель работы, отмечена научная новизна и практическая

ценность полученных результатов, кратко изложено содержание работы.

Глава I посвящена построению моделей общей циркуляции планетных атмосфер, основанных на численном интегрировании уравнений газовой динамики, а также изложению явных разностных схем 2-го порядка точности для интегрирования этих уравнений. В *разделе I.1* описана общая схема построения указанных выше моделей и рассмотрены все этапы построения. В *разделе I.2* приведены и анализируются различные формы записи уравнений газовой динамики для планетных атмосфер, а также приведены формулы для потенциала силы тяготения Земли с учетом ее несферичности. В *разделе I.3* изложен новый вариант явной гибридной разностной схемы для численного интегрирования системы уравнений газовой динамики на регулярной 3-мерной пространственной сетке в декартовых координатах без учета и с учетом источниковых членов, содержащих ускорение внешних массовых сил. В *разделе I.4* изложен новый вариант явной гибридной разностной схемы для численного интегрирования системы уравнений газовой динамики на регулярной 3-мерной пространственной сетке в сферических координатах без учета и с учетом источниковых членов, содержащих ускорение внешних массовых сил. В *разделе I.5* изложена система уравнений, предназначенная для описания динамики смеси воздуха, водяного пара и аэрозолей из микрокапель воды и микрочастиц льда с учетом фазовых переходов между различными состояниями воды, а также изложена методика численного интегрирования этой системы, использующая изложенную в этой главе явную гибридную схему. В *разделе I.6* изложено упрощенное описание радиационного нагрева атмосферы в релаксационном приближении. В *разделе I.7* изложены основные детали программной реализации рассматриваемых моделей общей циркуляции планетных атмосфер на графических процессорах последних моделей с использованием технологии CUDA. В *разделе I.8* приведено заключение к главе I.

Глава II посвящена изучению с помощью численного моделирования физических механизмов, которые формируют такие особенности

общей циркуляции атмосферы Венеры, как зональная суперротация, наличие в каждой полярной области от одного до трех вихревых течений с нисходящим воронкообразным течением в центре вихря, понижение высоты верхней границы облачного слоя в районе полюсов, а также посвящена изучению влияния на общую циркуляцию атмосферы Венеры рельефа поверхности. В *разделе II.1* изложено введение этой главы. Здесь обсуждаются основные закономерности общей циркуляции атмосферы Венеры, известные из данных наблюдений, и результаты моделирования этих закономерностей с помощью моделей, ранее созданных другими научными группами. В *разделе II.2* изложено описание новой модели циркуляции атмосферы Венеры, в которой учитывается рельеф поверхности, и которая основана на численном интегрировании уравнений газовой динамики. В *подразделе II.2.1* приведена система уравнений, размеры области моделирования, расчетная сетка и ее шаги и метод численного интегрирования. В *подразделе II.2.2* излагается упрощенное описание нагрева атмосферы Венеры солнечным и собственным ИК-излучением с использованием так называемого релаксационного приближения. В *подразделе II.2.3* приведены начальные и граничные условия. Указано начальное распределение плотности воздуха и температуры. Описывается распределение компонент скорости ветра в начальный момент. В *разделе II.3* детально изложены результаты моделирования. В *разделе II.4* изложен анализ результатов моделирования и проведено сравнение этих результатов с данными наблюдений. В *разделе II.5* приведено заключение ко второй главе.

Глава III посвящена исследованию общей циркуляции атмосферы Титана при помощи численного моделирования. В *разделе III.1* изложено введение этой главы. Здесь обсуждаются основные закономерности общей циркуляции атмосферы Титана, известные из данных наблюдений. В *разделе III.2* изложено описание новой модели циркуляции атмосферы Титана, в которой учитывается рельеф поверхности, и которая основана на численном интегрировании уравнений газовой динамики. В *подразделе III.2.1* приведена система уравнений, размеры области моделирования, расчетная сетка и ее шаги и метод численного интегри-

рования. В *подразделе III.2.2* излагается упрощенное описание нагрева атмосферы Титана солнечным и собственным ИК–излучением с использованием так называемого релаксационного приближения. В *подразделе III.2.3* приведены начальные и граничные условия. Указано начальное распределение плотности воздуха и температуры. Описывается распределение компонент скорости ветра в начальный момент. В *разделе III.3* детально изложены результаты моделирования для условий равноденствия и при нахождении подсолнечной точки в северном полушарии на широтах 5, 10, 15 и 15 градусов. В *разделе III.4* изложен анализ результатов моделирования и проведено сравнение этих результатов с данными наблюдений. В *разделе III.5* приведено заключение к третьей главе.

Глава IV посвящена описанию двух моделей общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли и представлению результатов моделирования, полученных с помощью этих моделей. В *разделе IV.1* изложено введение этой главы. В *разделе IV.2* изложено описание первой модели. В *подразделе IV.2.1* приведена система уравнений, указаны размеры области моделирования и шаги сетки по всем направлениям. В *подразделе IV.2.2* изложено упрощенное описание нагрева атмосферы Земли солнечным и собственным ИК–излучением с использованием релаксационного приближения. В *подразделе IV.2.3* приведены начальные и граничные условия модели. В *разделе IV.3* изложены результаты моделирования и проводится их анализ. В *разделе IV.4* изложено краткое описание второй модели. В *разделе IV.5* изложены результаты моделирования глобальной ветровой системы атмосферы Земли при двух уровнях солнечной активности в январских условиях и проводится анализ этих результатов. В *разделе IV.6* изложены результаты моделирования глобальной ветровой системы атмосферы Земли при двух уровнях солнечной активности в июльских условиях и проводится анализ этих результатов. В *разделе IV.7* приведено заключение к четвертой главе.

Глава V посвящена численному моделированию процессов формирования циклонических вихрей в тропической атмосфере Земли в области внутритропической зоны конвергенции с помощью региональной модели. В *разделе V.1* изложено введение этой главы. В *разделе V.2* из-

ложено описание региональной модели. В *подразделе V.2.1* приведена система уравнений, указаны размеры области моделирования и шаги сетки по всем направлениям. В *подразделе V.2.2* изложено упрощенное описание нагрева атмосферы Земли солнечным и собственным ИК-излучением с использованием релаксационного приближения. В *подразделе V.2.3* приведены начальные и граничные условия региональной модели. В *разделе V.3* изложены результаты моделирования и проводится их сравнение с данными наблюдений. В *разделе IV.4* приведено заключение к пятой главе.

В **заключении** сформулированы результаты диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Создана общая методика построения моделей общей циркуляции планетных атмосфер, основанных на численном интегрировании уравнений газовой динамики, и разработан эффективный способ программной реализации этих моделей на графических процессорах последних моделей с использованием технологии CUDA.
2. Созданы новые варианты явной гибридной разностной схемы для численного интегрирования системы уравнений газовой динамики со 2-м порядком точности на регулярных пространственных сетках в декартовых и в сферических координатах с учетом ускорения внешних массовых сил, которые обеспечивает отсутствие нефизического разогрева или выхолаживания атмосферы при проведении расчетов на большом промежутке времени. В этой схеме в качестве рабочих переменных используются компоненты плотности импульса в декартовых координатах. Эта схема является консервативной, монотонной и устойчивой при выполнении условия Куранта. Она обладает хорошей точностью и позволяет вести безаварийные расчеты без использования сглаживающих фильтров сколь угодно долго по времени. Эта схема хорошо себя зарекомендовала при расчетах динамики сложных трехмерных течений сжимаемого газа

и позволяет очень эффективно использовать параллельные вычисления на графических процессорах.

3. Построена система уравнений, описывающая динамику смеси воздуха, водяного пара и аэрозолей из микрокапель воды и микрочастиц льда с учетом фазовых переходов между различными состояниями воды, а также создана методика численного интегрирования этой системы, использующая созданную в этой работе явную гибридную схему.
4. Создана программная реализация модели общей циркуляции атмосферы Венеры, которая основана на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики, причем в модели учитывается рельеф поверхности Венеры и используется равномерная сетка в связанной с центром Венеры сферической системе координат с шагом сетки по вертикали 250 м и шагами сетки по горизонтальным направлениям менее 1° . Программная реализация модели выполнена с использованием параллельных вычислений на нескольких графических процессорах одновременно. Представленная модель позволяет исследовать ряд динамических процессов, которые ранее были недоступны для моделирования с помощью известных гидростатических моделей. К таким процессам относятся волновые процессы, а также вихри в полярных областях на высотах 60–80 км.
5. Разработан упрощенный способ расчета поля объемной мощности нагрева–охлаждения атмосферы Венеры за счет солнечного и собственного электромагнитного излучения, который позволяет исследовать ряд важных процессов в атмосфере Венеры. Изложены результаты численного моделирования общей циркуляции атмосферы Венеры, полученные с помощью представленной модели при использовании предложенного упрощенного способа расчета нагрева–охлаждения атмосферы Венеры излучением.
6. Впервые в мировой практике при моделировании удалось получить одновременно такие особенности общей циркуляции атмосферы

ры Венеры, как зональную суперротацию на высотах менее 80 км, изменение типа горизонтальной циркуляции на высотах 80–95 км от зональной суперротации к циркуляции с преобладанием переноса атмосферного газа из центра дневной стороны на центр ночной стороны через области средних широт и через полярные шапки, а также наличие вблизи полюсов нисходящих воронкообразных течений на высотах 60–80 км, которые известны из наблюдений.

7. Впервые в мировой практике исследовано влияние рельефа на общую циркуляцию атмосферы Венеры с использованием полной системы уравнений газовой динамики. Показано, что из-за обтекания рельефа зональным течением генерируются подветренные волны, которые, распространяясь вверх, становятся источником возмущений для формирования выше слоя зональной суперротации системы волн, усиливающих вертикальный перенос и обнаруженных при помощи наблюдений.
8. Впервые создана программная реализация модели общей циркуляции атмосферы Титана, основанной на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики. В модели учитывается рельеф поверхности Титана и используется равномерная сетка в сферической системе координат с вертикальным разрешением 1 км и горизонтальным разрешением лучше 1° , а также используются параллельные вычисления на нескольких графических процессорах одновременно. Эта модель позволяет исследовать ряд динамических процессов, которые ранее были недоступны для моделирования с помощью известных гидростатических моделей.
9. Впервые с помощью моделирования эволюции общей циркуляции атмосферы Титана при смене сезонов от весеннего равноденствия до середины лета в северном полушарии получены следующие важные закономерности общей циркуляции атмосферы Титана. Первая из них заключается в том, что примерно через 4000 часов физического времени после начала моделирования распределения всех параметров выходят на квазипериодический режим, на кото-

рый накладываются различные волновые и колебательные процессы с различными временными масштабами. Амплитуды колебаний и волн становятся заметными, начиная с высот примерно 200 км, и увеличиваются с ростом высоты. Вторая закономерность заключается в том, что для всех рассматривавшихся сезонов были получены зональная суперротация атмосферы Титана и термический прилив на дневной стороне. При этом часть атмосферы, в которой имеет место зональная суперротация, ограничена сверху, причем при удалении подсолнечной точки от экватора ядро обгоняющего вращения Титана зонального течения смещается в зимнее полушарие, а условная верхняя граница этого течения понижается. Третья закономерность полученной при моделировании общей циркуляции атмосферы Титана заключается в том, что в атмосфере Титана имеет место существенный вертикальный перенос, причем величина вертикального ветра на высоте 200 км может превышать 1 м/с, а на высоте 380 км может превышать 5 м/с. При этом наиболее интенсивная вертикальная циркуляция получилась при равноденствии и при удалении подсолнечной точки от экватора менее 7° на высотах более 200 км в верхней части слоя атмосферы, в котором имеет место суперротация, и в котором величина зональной компоненты ветра с ростом высоты либо не увеличивается, либо постоянна. В этом слое на низких и средних широтах формируется система волн с вертикальным и зональным движением атмосферного газа, которые движутся вместе с обгоняющим вращением Титана зональным потоком. В этих волнах вертикальный ветер усиливается с ростом высоты, и его величина может превышать 10 м/с на высотах более 450 км. Отметим, что при горизонтальном разрешении модели грубее 1° получить указанную выше интенсивную вертикальную циркуляцию не удавалось. В областях, где имеется интенсивная вертикальная циркуляция, имеет место существенное нарушение гидростатического равновесия. Четвертая закономерность заключается в том, что при моделировании для условий равноденствия в диапазоне высот от 350 до 500 км полу-

чились горячие слои, обусловленные динамическим нагревом атмосферного газа при торможении его достаточно быстрых течений. Согласно инженерной модели температуры атмосферы Титана, на этих высотах температура должна убывать с ростом высоты.

10. Создана программная реализация модели общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли, основанной на численном интегрировании полной системы уравнений динамики вязкого атмосферного газа на пространственной сетке с горизонтальным разрешением 0.46875° и разрешением по высоте 200 м. В модели предусмотрена вставка области, в которой шаг сетки по горизонтальным направлениям в 4 или в 8 раз меньше, чем в остальной области моделирования, а также учитываются рельеф земной поверхности и наличие в атмосфере аэрозолей из воды и льда, а также фазовые переходы водяного пара в аэрозольные частицы и обратно. Программная реализация модели использует массивные параллельные вычисления на нескольких графических ускорителях и позволяет на новом уровне исследовать динамические процессы в атмосфере Земли, в частности, позволяет моделировать процессы возникновения, движения и эволюции крупномасштабных вихрей в земной атмосфере. Показано, что при использовании предложенного в диссертации упрощенного способа расчета нагрева атмосферы Земли излучением модель воспроизводит общую циркуляцию атмосферы Земли, в которой имеется внутритропическая зона конвергенции с характерным для этой зоны сдвиговым течением на границе ячеек циркуляции Хедли, а также воспроизводит колебания и изгибы этого течения.
11. Создана модель, предназначенная для получения стационарного численного решения уравнений движения атмосферы при стационарном распределении температуры воздуха, которое задается по эмпирической модели NRLMSISE-00 для различных гео- и гелиофизических условий. В этой модели, как и в первой модели, не используется уравнение гидростатики. Температура воздуха во второй модели не рассчитывается, а является входным параметром.

Получаемые с помощью этой модели стационарные решения не реализуются на практике, но отражают многие качественные черты наблюдаемой циркуляции атмосферы. Изучая различия между модельными стационарными решениями, полученными при различных полях температуры воздуха, можно судить о влиянии на общую циркуляцию атмосферы Земли различных гео- и гелиофизических факторов, изменяющих тепловой режим земной атмосферы. Представлены результаты расчетов крупномасштабной циркуляции атмосферы при двух уровнях солнечной активности для условий, когда в Северном полушарии зима, и для условий, когда в Северном полушарии лето. Эти результаты показали, что, несмотря на независимость глобальных распределений температуры, заданной по эмпирической модели NRLMSISE-00, от солнечной активности на высотах ниже 90 км, влияние солнечной активности на крупномасштабную циркуляцию стратосферы и мезосферы существует и доказывает взаимосвязь между циркуляциями средней атмосферы и термосферы.

12. Создана программная реализация региональной модели циркуляции нижней атмосферы Земли, основанная на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики на пространственной сетке с горизонтальным разрешением лучше 0.1° и разрешением по высоте 200 м, причем в модели учитывается наличие аэрозолей из воды и льда и фазовых переходов водяного пара в аэрозольные частицы и обратно, и используются массивно-параллельные вычисления на нескольких графических ускорителях одновременно.
13. Проведено численное моделирование развития неустойчивости сдвигового течения во внутритропической зоне конвергенции и проведено сравнение результатов с данными спутникового мониторинга. Показано, что появление искривленных участков центрального сдвигового течения внутритропической зоны конвергенции, имеющих длину 800–2000 км, в случае, когда в указанном сдвиговом течении имеется достаточно большой градиент горизонтального вет-

ра, приводит к развитию гидродинамической неустойчивости сдвигового течения и распаду этого течения на участке длиной 5000–7000 км с образованием за 40–70 часов крупномасштабных циклонических вихрей, имеющих диаметр 800–1200 км и скорость ветра до 15–20 м/с. Эти циклонические вихри могут со временем либо затухнуть, либо развиться над океанами в тропические циклоны и ураганы, а над Сахарой вызывать песчаные бури.

14. Обоснован вывод, что появление искривленных участков центрального сдвигового течения ВЗК в период с июня по сентябрь является предвестником образования крупномасштабных циклонических вихрей, которые могут со временем либо затухнуть, либо развиться в тропический циклон, если первичный вихрь возник над океаном внутри теплой и влажной воздушной массы с достаточно большими горизонтальными размерами. Обнаружение искривленных участков центрального сдвигового течения ВЗК при помощи спутниковых наблюдений внутри теплой и влажной воздушной массы или на ее западной границе указывает на то, что высока вероятность образования тропического циклона или урагана в течение 4–7 суток. При этом по положению ВЗК и обнаруженного искривленного участка можно предсказать район зарождения тропического циклона. Таким образом, исследованы физические механизмы образования крупномасштабных циклонических вихрей в районе ВЗК и обоснована методика их раннего предсказания.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликованы следующие работы в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях из перечня ВАК:

1. Белоцерковский О.М., Мингалев И.В., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Опарин А.М. О механизме возникновения крупномасштабного вихря в тропосфере над неравномерно нагретой поверхностью // ДАН. 2006. Т. 410. № 6. С. 816–820.

2. Белоцерковский О.М., Мингалев И.В., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Опарин А.М., Чечеткин В.М. Образование крупномасштабных вихрей в сдвиговых течениях в нижней атмосфере Земли в области тропических широт // Космические исследования. 2009. Т. 47. №6, С. 501–514.
3. Игнатъев Н.И., Мингалев И.В., Родин А.В., Федотова Е.А. Новый вариант метода дискретных ординат для расчета собственного излучения в горизонтально однородной атмосфере // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55. №10. С. 1741–1755.
4. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Чечеткин В.М. Возможность предсказания образования тропических циклонов и ураганов по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 290–296.
5. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Чечеткин В.М., Мингалев В.С., Мингалев О.В. Численное моделирование формирования циклонических вихревых течений в области внутритропической зоны конвергенции и их раннее обнаружение // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 3. С. 242–257.
6. Мингалев И.В., Астафьева Н.М., Орлов К.Г., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Чечеткин В.М. Влияние геометрии течения воздушных масс в области внутритропической зоны конвергенции на процесс формирования циклонических вихрей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 4. С. 154–161.
7. Мингалев В.С., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Опарин А.М., Орлов К.Г. Обобщение монотонной гибридной схемы второго порядка для уравнений газовой динамики на случай нерегулярной пространственной сетки // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2010. Т. 50, №5. С. 923–936.

8. Мингалев И. В., Мингалев В. С. Модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли при заданном распределении температуры // Математическое моделирование. 2005. Т. 17, № 5. С. 24–40.
9. Мингалев И.В., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Каземинеджад Б., Ламмер Х., Бирнат Х.К., Лихтенегер Х.И.М., Швингеншу К., Рукер Х.О. Численное моделирование циркуляции атмосферы Титана: интерпретация измерений зонда HUYGENS // Космические исследования. 2009. Т. 47, № 2. С. 134–145.
10. Мингалев И.В., Орлов К. Г., Мингалев В.С. Механизм образования полярных циклонов и возможность их прогноза // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 255–262.
11. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Мингалев В.С. Механизм формирования полярных циклонов и возможность их предсказания по данным спутниковых наблюдений // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 2. С. 166–175.
12. Мингалев И.В., Родин А.В., Орлов К.Г. Негидростатическая модель общей циркуляции атмосферы Венеры // Астрономический вестник. 2012 г. Т. 46, № 4. С. 282–296.
13. Мингалев И. В., Родин А. В., Орлов К. Г. Численное моделирование общей циркуляции атмосферы Венеры. Влияние рельефа поверхности и режима нагрева излучением // Астрономический вестник. 2015. Т. 49, № 1, стр. 27–45.
14. Mingalev I.V., Astafieva N.M., Orlov K.G., Mingalev V.S., Mingalev O.V., Chechetkin V.M. A simulation study of the formation of large-scale cyclonic and anticyclonic vortices in the vicinity of the intertropical convergence zone // ISRN Geophysics, Volume 2013, Article ID 215362, 12 pages, (<http://dx.doi.org/10.1155/2013/215362>).
15. Mingalev I.V., Astafieva N.M., Orlov K.G., Mingalev V.S., Mingalev O.V., Chechetkin V.M. Numerical modeling of the initial formation of cyclonic vortices at tropical latitudes // Atmospheric and Climate Sciences, 2014, Vol. 4, pp. 899–906.

16. *Mingalev I.V., Mingalev V. S., Mingalev O.V., Kazeminejad B., Lammer H., Biernat H. K., Lichtenegger H. I. M., Schwingenschuh K., and Rucker H. O.* First simulation results of Titan's atmosphere dynamics with a global 3-D non-hydrostatic circulation model // *Annales Geophysicae*. 2006, Vol. 24. No. 8. P. 2115–2129. Sref-ID: 1432-0576/ag/2006-24-2115.
17. *Mingalev I.V., Mingalev O.V., Mingalev V.S.* Model simulation of the global circulation in the middle atmosphere for January conditions // *Advances in Geosciences*. 2008, Vol. 15. P. 11–16.
18. *Mingalev I., Mingaleva G., Mingalev V.* A simulation study of the effect of geomagnetic activity on the global circulation in the Earth's middle atmosphere // *Atmospheric and Climate Sciences*, Vol. 3, No. 3A, 2013, pp. 8–19, doi:10.4236/acs.2013.33A002, (<http://www.scirp.org/journal/acs>).
19. *Mingalev I. V., Mingalev V. S., Mingaleva G. I.* Numerical simulation of the global distributions of the horizontal and vertical wind in the middle atmosphere using a given neutral gas temperature field. // *Journal Atmos. Solar–Terr. Phys.* 2007. Vol. 69, Nos. 4/5. P. 552–568.
20. *Mingalev I., Orlov K., Mingalev V.* A Modeling Study of the Initial Formation of Polar Lows in the Vicinity of the Arctic Front // *Advances in Meteorology*, 2014, Vol. 2014 b, Article ID 970547, 10 p.
21. *Mingalev I.V., Orlov K.G., Mingalev V.S.* A computational study of the transformation of global gas flows in the Earth's atmosphere over the course of a year // *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2014, Vol. 4, pp. 379–402.