

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию Мингалёва Игоря Викторовича  
«Численное моделирование общей циркуляции атмосфер Земли, Венеры и Титана,  
а также процессов образования циклонов в атмосфере Земли»,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ**

Диссертационная работа И.В. Мингалёва посвящена созданию моделей общей циркуляции атмосфер планет на примерах Земли, Венеры и Титана. В основе моделей лежат полные уравнения газовой динамики, которые численно интегрируются на трехмерной пространственной сетке с высоким разрешением по явной консервативной монотонной гибридной разностной схеме 2-го порядка точности при максимальном использовании массивно-параллельных вычислений на графических процессорах.

Представленные в работе модели являются новым инструментом для исследования различных динамических процессов в атмосферах планет. Исследование этих процессов является очень важной и актуальной задачей физики планет и физики атмосферы. С помощью созданных моделей методом численного моделирования получены новые важные физические результаты: построена модель общей циркуляции атмосфер планет при наличии водяного пара и аэрозолей, а также с учетом рельефа. Построена также модель радиационного нагрева атмосферы в релаксационном приближении, на основе которой изучены процессы формирования циклонических вихрей в приэкваториальной области тропосферы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель работы, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Глава I посвящена построению моделей общей циркуляции планетных атмосфер, основанных на численном интегрировании уравнений газовой динамики, а также построению явных разностных схем 2-го порядка точности для интегрирования этих уравнений и методам программной реализации этих моделей с использованием массивно-параллельных вычислений на графических процессорах. В этой главе впервые детально изложена общая методика построения указанных моделей. Впервые созданы варианты явной консервативной монотонной гибридной разностной схемы для численного интегрирования системы уравнений газовой динамики с учетом ускорения внешних массовых сил. Эти варианты обеспечивают 2-й порядок точности и отсутствие нефизического разогрева или выхолаживания планетных атмосфер при проведении

расчетов с одинарной точностью 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.

Глава II посвящена изучению с помощью численного моделирования физических механизмов, которые формируют особенности общей циркуляции атмосферы Венеры. В этой главе впервые создана программная реализация модели общей циркуляции атмосферы Венеры с учетом рельефа поверхности, основанная на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики со 2-м порядком точности, на пространственной сетке с высоким разрешением, а также параллельные вычисления на нескольких графических процессорах одновременно. С помощью этой модели методом численного моделирования 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 подветренных 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.

Глава III посвящена исследованию общей циркуляции атмосферы Титана при помощи численного моделирования. В этой главе впервые создана программная реализация модели общей циркуляции атмосферы Титана с учетом рельефа поверхности, основанная на численном интегрировании полной системы уравнений газовой динамики со 2-м порядком точности, на пространственной сетке с высоким разрешением, а также параллельные вычисления на нескольких графических процессорах одновременно. С помощью этой модели методом численного моделирования эволюции общей циркуляции атмосферы Титана при смене сезонов от весеннего равноденствия до середины лета в северном полушарии получены четыре важных закономерности этой циркуляции и изучено влияние рельефа на эту циркуляцию.

В главе IV созданы две модели общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли и представлены результаты моделирования, полученные с помощью этих моделей. Первая модель является моделью общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли и основана на численном интегрировании полной системы уравнений динамики вязкого атмосферного газа на пространственной сетке с высоким разрешением. В этой модели учитываются рельеф земной поверхности и наличие в атмосфере аэрозолей в виде

микрокапель воды и ледяных микрочастиц, а также фазовые переходы водяного пара в аэрозольные частицы и обратно. Данная модель предназначена для изучения структуры и эволюции атмосферных движений в широком диапазоне пространственно--временных масштабов. Вторая модель предназначена для получения стационарного численного решения уравнений движения атмосферы при стационарном распределении температуры воздуха, которое задается по эмпирической модели для различных гелиогеофизических условий. Впервые исследовано влияние солнечной активности на крупномасштабную циркуляцию стратосферы и мезосферы Земли.

Глава V посвящена численному моделированию процессов формирования циклонических вихрей в атмосфере Земли в области внутритропической зоны конвергенции. 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 обоснован физический механизм образования крупномасштабных циклонических вихрей в районе внутритропической зоны конвергенции и обоснована методика прогноза их образования.

Все содержащиеся в диссертации И.В. Мингалева результаты представляются весьма важными и актуальными, а также являются новыми и имеют большое научное и практическое значение. Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертации, подтверждается согласием с наблюдательными данными и выводами других авторов.

Диссертация написана ясным языком и хорошо иллюстрирована. Сформулированные в диссертации научные положения и выводы достоверны и надежны. Достоверность результатов обеспечивается также сравнением, где это возможно, полученных результатов с результатами экспериментов и теоретических исследований. Надежно обоснованы все выносимые на защиту положения.

Тем не менее, по работе имеется ряд замечаний.

Во-первых, было бы желательно более детально исследовать релаксационное приближение, которое дает весьма хорошие результаты при численном моделировании, но не содержит подробного алгоритмического указания на способ подбора подходящей релаксационной температуры, что затрудняет применение этого метода в других, не рассмотренных автором, ситуациях.

Во-вторых, применительно к моделированию зарождения циклонов и вихревых течений также есть замечание практического характера: автор приводит результаты модельных расчетов и довольно подробно обсуждает обнаруженные эффекты, которые качественно подтверждаются при сравнении с типичными движениями атмосферных масс в реальности. Однако не дается прямого сравнения расчетов с конкретным, например, днем или с конкретной ситуацией возникновения и развития вихря. Хотелось бы, чтобы модель была не только исследовательским инструментом, но и давала бы рекомендации в определенных актуальных ситуациях.

В развитие первых двух замечаний следует указать, что в модели отсутствуют химические реакции, что не позволяет использовать этот инструмент для задач переноса приповерхностных загрязнений атмосферы в результате антропогенного воздействия. Хотя такой задачи в диссертации и не ставилось, разработанный инструментариий представляется весьма подходящим для применения его и к таким вопросам. Желательно было бы развить работу в этом направлении. Учет химической кинетики мог бы косвенным образом дать оценку устойчивости используемых моделей и, в частности, упомянутого релаксационного приближения: какие возмущения теплового режима или состава атмосферы являются критическими для построения модели в том виде, в каком она дана в диссертации.

Указанные недостатки несколько не снижают общего высокого научного уровня работы и ее практической значимости.

Диссертация И.В. Мингалева является законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно, и отражает новые важные результаты в области прикладной математики, физике планетных атмосфер и геофизике. Основные результаты опубликованы в 21 статье, соответствующих перечню ВАК для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Совокупность полученных результатов позволяет квалифицировать их как крупное научное достижение. Результаты имеют большое научное и практическое значение.

Приложение полученных результатов целесообразно для исследования общей циркуляции атмосфер планет в ПГИ РАН, а также в Институте астрономии РАН, ИКИ РАН, и других организациях, занимающихся решением фундаментальных и прикладных проблем циркуляции атмосфер Земли и планет. Результаты по методам построения моделей имеют большую практическую значимость для применения в численном моделировании атмосфер планет.

Считаю, что диссертационная работа Мингалева Игоря Викторовича «Численное моделирование общей циркуляции атмосфер Земли, Венеры и Титана, а также процессов

образования циклонов в атмосфере Земли», удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор И.В. Мингалев, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук. Результаты работы представляют интерес для специалистов в областях геофизики, физики атмосфер Венеры и Титана, а также прикладной математики, имеют большое практическое значение для космических исследований при решении задач исследования атмосфер планет. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

29 февраля 2016 г.

Официальный оппонент,  
доктор физ.-мат. наук

Ю.Н. Орлов

Подпись Ю.Н. Орлова заверяю. Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН  
к.ф.-м.н. А.И. Маслов

