

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
прикладной математики и  
информатики**

**А.М. Райгородский**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Моделирование атмосферы и прогноз погоды
<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Прикладная математика и информатика Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра вычислительных технологий и моделирования в геофизике и биоматематике
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: М.А. Толстых, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры вычислительных технологий и моделирования в геофизике и биоматематике 15.03.2024

## Аннотация

Дисциплина "Моделирование атмосферы и прогноз погоды" занимается изучением процессов, происходящих в атмосфере Земли, и разработкой математических моделей для их описания. С помощью этих моделей ученые стремятся прогнозировать погодные явления, такие как температура, осадки, ветер и давление. Важными аспектами являются сбор и анализ метеорологических данных, численное моделирование процессов в атмосфере и интерпретация результатов для предсказания погоды на различные временные интервалы. Дисциплина также занимается изучением климатических изменений и их влияния на погоду. Курс занятий имеет целью формирование базовых знаний по вычислительной геофизической гидродинамике для использования в областях и дисциплинах естественнонаучного профиля, получение решения в виде графиков, понимание базовых принципов построения моделей региональной и глобальной динамики океана и атмосферы, основанных на полной системе уравнений геофизической гидродинамики, понимание базовых принципов построения совместных моделей Земной системы.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение методов численного решения уравнений гидротермодинамики атмосферы и особенностей их реализации на параллельных вычислительных системах

### Задачи дисциплины

- освоение студентами численных методов, применяемых для моделирования динамики атмосферы и океана;
- формирование навыков решения практических задач с использованием методов вычислительной физики;
- обучение студентов основам программной реализации изучаемых методов на параллельных вычислительных системах.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.1 Знает основы научно-исследовательской деятельности в области информационных технологий, владеет знанием основ философии и методологии науки; знанием методов научных исследований и навыками их проведения
	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности
	ПК-2.3 Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области информационно-коммуникационных технологий
	ПК-2.4 Владеет методами и алгоритмами решения задач цифровой обработки сигналов, использования сети Интернет, аннотирования, реферирования, библиографического поиска, опыт работы с научными источниками
ПК-3 Владеет навыками участия в научных дискуссиях, выступления с сообщениями и докладами устного, письменного и виртуального (размещение в информационных сетях) характера	ПК-3.1 Знает основы ведения научной дискуссии и формы устного научного высказывания
	ПК-3.2 Умеет вести корректную дискуссию в области информационных технологий задавать вопросы и отвечать на поставленные вопросы по теме научной работы

информационных систем) характера, представления материалов собственных исследований	ПК-3.3 Имеет практический опыт участия в научных студенческих конференциях, очных, виртуальных, заочных обсуждениях научных проблем в области информационных технологий
ПК-1 Готов к включению в профессиональное сообщество; способен проводить под научным руководством локальные исследования на основе существующих методов в конкретной области профессиональной деятельности	ПК-1.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации; владеет навыками подготовки научных обзоров, публикаций, рефератов и библиографий по тематике проводимых исследований на русском и английском языке
	ПК-1.2 Умеет решать научные задачи с пониманием существующих подходов к верификации моделей программного обеспечения в связи с поставленной целью и в соответствии с выбранной методикой
	ПК-1.3 Имеет практический опыт выступлений и научной аргументации при анализе объекта научной и профессиональной деятельности

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- принципы симметрии и законы сохранения;
- разностные схемы, сохраняющие интегральные инварианты (энергию и энтрофию);
- различные типы сеток по горизонтали и способы дискретизации уравнений гидротермодинамики атмосферы на них;
- свойства и границы применимости изучаемых методов.

уметь:

- самостоятельно выбрать вычислительную сетку по горизонтали и метод решения на ней в зависимости от типа решаемой геофизической задачи;

владеть:

- навыками построения дискретной аппроксимации систем уравнений в частных производных гиперболического типа;
- знаниями, как проводить анализ разностных схем.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и его практическое применение. Численный прогноз погоды на различных временных масштабах.	4	3		15
2	Построение разностных схем, сохраняющих интегральные инварианты двумерной жидкости. Инерционно-гравитационные волны в атмосфере и океане и их аппроксимация на различных сетках.	4	3		15

3	Системы вертикальных координат в моделях атмосферы и океана. Решение трехмерных уравнений гидротермодинамики атмосферы. Моделирование процессов в облачной атмосфере с учетом аэрозолей.	3	6		15
4	Различные системы координат. Законы сохранения для уравнений. Необходимость параметризации процессов подсеточного масштаба. Решение уравнений гидротермодинамики конечно-разностным, спектральным и полулагранжевым методом.	4	3		15
Итого часов		15	15		60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 1 (Осенний)

1. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и его практическое применение. Численный прогноз погоды на различных временных масштабах.

Модели общей циркуляции атмосферы. Виды моделей: глобальные, по ограниченной территории, их особенности. Области применения моделей. Бесшовные модели.

Постановка задачи численного прогноза погоды. Виды численных прогнозов – детерминированный и ансамблевый. Особенности численных прогнозов погоды различной заблаговременности.

Основные уравнения. Физические особенности и возможности их упрощения.

2. Построение разностных схем, сохраняющих интегральные инварианты двумерной жидкости. Инерционно-гравитационные волны в атмосфере и океане и их аппроксимация на различных сетках.

Разностные схемы для двумерной жидкости или газа, сохраняющие энтрофию и энергию. Также рассматриваются разностные схемы сохраняющие оба инварианта

Уравнение для инерционно-гравитационных волн. Разложение по собственным функциям вертикального оператора.

Пространственные сетки типа А, В, С. Аппроксимация фазовых и групповых скоростей гравитационных и инерционно-гравитационных волн на различных пространственных сетках. Рассматриваются типы сеток, применяемых в задаче глобального моделирования динамики атмосферы: регулярная широтно-долготная сетка, сетка типа "кубическая сфера", Инь-Янь и прочие.

3. Системы вертикальных координат в моделях атмосферы и океана. Решение трехмерных уравнений гидротермодинамики атмосферы. Моделирование процессов в облачной атмосфере с учетом аэрозолей.

Системы вертикальных координат в моделях атмосферы и океана ( $z$ ,  $p$ ,  $\sigma$ ). Способы аппроксимации по вертикали.

Законы сохранения. Воспроизведение градиента давления над топографически неоднородной поверхностью Земли в сигма-системе координат.

Моделирование формирования конвективной облачности с учетом микрофизических процессов, формирование облачности в системе вода-лед с использованием неравновесных функций распределения частиц по размерам. Моделирование кинетических процессов в атмосферной дисперсной системе с учетом нуклеации, конденсации, коагуляции. Роль аэрозолей и озона в атмосфере.

4. Различные системы координат. Законы сохранения для уравнений. Необходимость параметризации процессов подсеточного масштаба. Решение уравнений гидротермодинамики конечно-разностным, спектральным и полулагранжевым методом.

Сферическая система координат.  $Z$ ,  $P$ , сигма и гибридные вертикальные координаты. Осреднение уравнений динамики атмосферы и вклад в них подсеточных процессов. Адвективная и дивергентная форма записи уравнений.

Принципы построения конечно-разностных схем. Понятие аппроксимации и устойчивости. Простейшие конечно-разностные схемы решения уравнения переноса и теплопроводности. Спектральный и поллагранжевый метод решения уравнений динамики атмосферы.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Аудитория с проектором.

Обеспечение самостоятельной работы - базы данных по журналам Journal of Climate, Journal of Atmospheric Science.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987 г.
2. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. 2е изд. М.: Изд-во «Научный мир», 2003
3. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Пер. с англ. Под ред. В.П.Садокова. Л.: Гидрометеиздат, 1982

Дополнительная литература

4. Рябенский В.С. Введение в вычислительную математику. 2-е изд., исправ. - М.: Физматлит, 2000. 296с. ISBN 5-9221-047-5.
5. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.Г. Численные методы. 8-ое изд. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000, 624 с.
6. Durrant D. Numerical Methods for Fluid Dynamics (With Applications to Geophysics) 2nd Edition, Springer, 2010, 512 стр.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

1. <http://vsc.inm.ras.ru>
2. <https://www.ecmwf.int/en/learning/workshops-and-seminars/workshop-numerical-and-computational-methods-simulation-all-scale-geophysical-flows>
3. <https://confluence.ecmwf.int/display/OPTR/Advanced+Numerical+Methods>

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

1. <http://vsc.inm.ras.ru>

2.

<https://www.ecmwf.int/en/learning/workshops-and-seminars/workshop-numerical-and-computational-methods-simulation-all-scale-geophysical-flows>

3. <https://confluence.ecmwf.int/display/OPTR/Advanced+Numerical+Methods>

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы, алгоритмы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Прикладная математика и информатика Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра вычислительных технологий и моделирования в геофизике и биоматематике
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	М.А. Толстых, д-р физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.1 Знает основы научно-исследовательской деятельности в области информационных технологий, владеет знанием основ философии и методологии науки; знанием методов научных исследований и навыками их проведения
	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности
	ПК-2.3 Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области информационно-коммуникационных технологий
	ПК-2.4 Владеет методами и алгоритмами решения задач цифровой обработки сигналов, использования сети Интернет, аннотирования, реферирования, библиографического поиска, опыт работы с научными источниками
ПК-3 Владеет навыками участия в научных дискуссиях, выступления с сообщениями и докладами устного, письменного и виртуального (размещение в информационных сетях) характера, представления материалов собственных исследований	ПК-3.1 Знает основы ведения научной дискуссии и формы устного научного высказывания
	ПК-3.2 Умеет вести корректную дискуссию в области информационных технологий задавать вопросы и отвечать на поставленные вопросы по теме научной работы
	ПК-3.3 Имеет практический опыт участия в научных студенческих конференциях, очных, виртуальных, заочных обсуждениях научных проблем в области информационных технологий
ПК-1 Готов к включению в профессиональное сообщество; способен проводить под научным руководством локальные исследования на основе существующих методов в конкретной области профессиональной деятельности	ПК-1.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации; владеет навыками подготовки научных обзоров, публикаций, рефератов и библиографий по тематике проводимых исследований на русском и английском языке
	ПК-1.2 Умеет решать научные задачи с пониманием существующих подходов к верификации моделей программного обеспечения в связи с поставленной целью и в соответствии с выбранной методикой
	ПК-1.3 Имеет практический опыт выступлений и научной аргументации при анализе объекта научной и профессиональной деятельности

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Моделирование атмосферы и прогноз погоды» обучающийся должен:

### знать:

- принципы симметрии и законы сохранения;
- разностные схемы, сохраняющие интегральные инварианты (энергию и энтропию);
- различные типы сеток по горизонтали и способы дискретизации уравнений гидротермодинамики атмосферы на них;
- свойства и границы применимости изучаемых методов.

### уметь:

- самостоятельно выбрать вычислительную сетку по горизонтали и метод решения на ней в зависимости от типа решаемой геофизической задачи;



**владеть:**

- навыками построения дискретной аппроксимации систем уравнений в частных производных гиперболического типа;
- знаниями, как проводить анализ разностных схем.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

**4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

1. Особенности различных типов численных прогнозов погоды.
2. Что такое модель для бесшовного прогноза атмосферной циркуляции.
3. Как выглядят сетки типа А, В и С? В чем преимущества и недостатки этих сеток?
4. Какая(ие) сетки лучше для описания гравитационных (инерционно-гравитационных) волн?
5. Как реализуются боковые граничные условия в региональных моделях атмосферы?
6. Какие вертикальные системы координат применяются в моделях атмосферы (преимущества и недостатки)?
7. Сравнение одномерной и двумерной декомпозиции расчетной области.
8. Метод релаксации Девиса.
9. Одномерная нестационарная задача диффузии.
10. Одномерная нестационарная задача адвекции.

**Критерии оценивания**

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Во время проведения дифференцированного зачёта обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачёт может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.

### 3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется в форме экзамена, проводимого в устной форме.

Перечень вопросов и задач для сдачи экзамена в 1-м семестре;

1. Пусть солнечная постоянная  $S = 1368 \text{ Вт/м}^2$ , альbedo земли с учетом облачности  $A = 0.30$ , и температура Земли  $T$  определяется из условия радиационного равновесия  $\sigma T^4 = F$ , где  $F$  - поглощенная Землей коротковолновая радиация. Какое изменение температуры  $T$  произойдет при увеличении  $S$  на 1%? Какое изменение температуры  $T$  произойдет при уменьшении альbedo на 1%? Каково будет характерное время наступления этого изменения температуры, если при этом меняется температура в 500-метровом верхнем слое океана?

2. Почему в самые сильные западные ветры в тропосфере наблюдаются в зимнем полушарии около 30 градуса широты на высоте около 200 мб? Почему особенно сильные ветры расположены на той же долготе, что и максимумы осадков вблизи Экватора (например, в январе максимум осадков над Индонезией, а максимум скорости зонального ветра на уровне 200 мб над югом Японии)?

3. Уходящая на верхней границе атмосферы длинноволновая радиация составляет в среднем  $235 \text{ Вт/м}^2$ , что соответствует поглощенной коротковолновой радиации. Удвоение содержания  $\text{CO}_2$  уменьшает уходящую длинноволновую радиацию на  $4 \text{ Вт/м}^2$ . Оцените величину потепления, необходимую для того, чтобы скомпенсировать нарушение радиационного баланса. Радиационная температура Земли составляет 258 К. Обратными связями между температурой и водяным паром, а также альbedo и облаками пренебречь. Насколько в этом случае потеплеет через 1 год после мгновенного удвоения  $\text{CO}_2$ , если предположить, что при потеплении равномерно нагревается 100-метровый слой океана?

4. Рассматриваются данные среднесуточной температуры приповерхностного воздуха на 10 метеостанциях Московской области за последние 10 лет (то есть размерность по пространству 10, по времени 3650). Как вы думаете, какой будет первая ЭОФ этих данных?

5. Извержения вулканов нередко забрасывают значительное количество частиц пепла в стратосферу, где они существуют в течение нескольких месяцев или даже лет. Предполагая, что частицы отражают 1% приходящей к ним солнечной радиации и не влияют на прохождение длинноволновой радиации, оцените, какое равновесное изменение температуры можно ожидать в этом случае. Каким будет реальное изменение температуры поверхности через год после извержения, если в изменение температуры вовлечен 100-метровый слой океана. Обратными связями между температурой и водяным паром, а также количеством облаков, пренебречь.

6. Как вы думаете, почему максимальные скорости западного ветра в нижней мезосфере заметно меньше в январе в северном полушарии (60-70 м/с), чем в июле в южном полушарии (100-120 м/с)?

7. Вертикальный градиент температуры в тропиках в тропосфере близок к влажноадиабатическому. Учитывая зависимость влажноадиабатического градиента от температуры, оценить, где при удвоении содержания  $\text{CO}_2$  произойдет более сильное потепление: в тропической верхней тропосфере или у поверхности земли? Почему при явлении Эль-Ниньо в верхней тропосфере в тропиках обычно теплеет сильнее, чем у поверхности?

8. Какие законы сохранения выполняются для системы уравнений

$$\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla + \mathbf{v} \cdot \nabla = \epsilon$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + V \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \epsilon$$

где  $U$ ,  $V$  - заданные горизонтальные компоненты скорости ветра. Уравнения решаются в области  $x=[0;1]$ ,  $y=[0;1]$ , краевыми условиями по обеим координатам являются условия периодичности. Написать конечно-разностную схему для этих уравнений, в которой выполнялись бы аналогичные законы сохранения. При каком условии схема устойчива?

9. На широте 60N вблизи поверхности Земли скорость геострофического западного ветра, осредненная вдоль круга широты, составляет 5 м/с. Из-за трения о поверхность Земли ветер отклоняется от геострофического и появляется компонента ветра, направленная с юга на север, и равная 0.5 м/с. Найти величину ускорения, создаваемую силой трения.

10. Как вы думаете, в какой сезон в средних широтах северного полушария амплитуда долгопериодной атмосферной изменчивости максимальна? Почему?

11. На широте 45N в нижней мезосфере скорость геострофического зонального ветра составляет 50 м/с, а ускорение, сообщаемое потоку из-за разрушения гравитационных волн, составляет 0.001 м/с<sup>2</sup>. Найти величину меридиональной скорости ветра, возникающей вследствие отклонения ветра от геострофического.

12. Рассматриваются данные среднемесячной температуры воздуха у поверхности, осредненной по северному полушарию, и по южному полушарию,

за последние 10 лет (то есть по пространству размерность данных 2, по времени 240). Как вы думаете, каким будет первая ЭОФ для этих данных? Как должен выглядеть ее коэффициент Фурье?

13. Написать разностную схему, имеющую второй порядок по пространству, для уравнения

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

При каком условии схема будет устойчивой? Существуют ли для этой схемы законы сохранения при условии постоянства  $k$  и  $U$ ?

14. В некоторый момент времени на уровне 1990 м. на широте 60N геострофические скорости ветра составляют:  $U = 10$  м/с,  $V = -0.1$  м/с, а на высоте 2010 м.  $U = 10$  м/с,  $V = 0.1$  м/с. Используя соотношение термического ветра, скажите, следует ли ожидать потепления или похолодания на высоте 2000 м вследствие горизонтального переноса температуры?

15. Напишите конечно-разностную схему для решения уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

При каком условии схема будет устойчивой? Выполняются ли для этой схемы какие-либо законы сохранения при условии периодичности на границах?

16. Пусть поток зональной скорости ветра на север, обусловленный вихрями

$F = [U'V']$  составляет на широте 30N величину 50 (м/с)<sup>2</sup>, а на широте 60N составляет -10 (м/с)<sup>2</sup>, и линейно меняется между этими широтами. Какое ускорение зонального ветра на широте 45N вызывает дивергенция этого потока? Какова величина меридиональной агеострофической скорости ветра, обусловленная этим ускорением?

17. При положительном индексе арктической осцилляции скорость осредненного вдоль круга широты западного ветра на 60 градусе с.ш. и на уровне 100 мб на 10 м/с превышает среднее многолетнее значение, а у поверхности Земли на 2 м/с превышает среднее значение. Во сколько раз при этом меридиональный градиент температуры  $\partial T / \partial y$  на этой широте превышает по величине среднее значение, которое равно  $-5 \times 10^{-6} \text{ K/m}$ ?

18. В какой сезон меридиональная циркуляция Ферреля должна быть интенсивнее: летом или зимой? Как вы думаете, во сколько примерно раз интенсивнее?

19. Зимой на 60N средняя скорость западного ветра в средней тропосфере составляет 15 м/с. Какова для этих условий длина волны Россби, фазовая скорость которой относительно поверхности Земли равна нулю? Сравните полученный результат с длиной волны наблюдающихся зимних стационарных волн в средних широтах. Считать, что волновое число волны Россби по широте  $k_y$  равно нулю.

20. На юге России и в среднем Поволжье существует такая система земледелия, когда в первый год сажают сельскохозяйственные культуры; в следующий год ничего не сажают, а как только из земли появляются растения (сорняки), их сразу же перепахивают; в следующий год снова сажают сельскохозяйственные культуры, и т.д. Зачем так делают?

21. Почему в стратосфере и мезосфере летом ветер восточный, а зимой западный? Оцените, какая будет скорость зонального ветра на уровне 1 мб в средних широтах летнего и зимнего полушария, если на уровне 150 мб скорость равна нулю, а температура стратосферы, осредненная по высотам от 1 до 150 мб составляет на летнем полюсе 250 К, на Экваторе 230 К, а на зимнем полюсе 220 К, и температура меняется линейно в зависимости от широты.

22. Осредненный по поверхности Земли поток явного тепла составляет  $20 \text{ Вт/м}^2$ . Какова в этом случае средняя разность температуры между поверхностью земли и уровнем 2 метра, на котором обычно меряют температуру приземного воздуха, если усредненный по Земле безразмерный коэффициент обмена  $C_T$  для этой высоты равен 0.003, а модуль скорости приземного ветра 5 м/с? Как вы думаете, почему градиент температуры между поверхностью и высотой 2 м. по модулю гораздо больше адиабатического?

23. Почему в средних широтах северного полушария циклоны обычно движутся с юга на север по отношению к среднему потоку, а антициклоны - с севера на юг? Почему вблизи центра циклона может быть очень сильный ветер, а вблизи центра антициклона почти всегда безветренно?

24. В модели почвы решаются следующие уравнения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Здесь  $T$  - температура,  $W$  - влажность,  $z = [0, z_0]$  глубина,  $\kappa_T$ ,  $\kappa_W$ ,  $\kappa_{TW}$ ,  $\epsilon$  - заданные функции температуры и влажности. Выполняются ли какие-нибудь законы сохранения для этих уравнений, если при  $z=0$  и при  $z=z_0$  заданы условия

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad \epsilon = 0$$

Напишите конечно-разностную схему второго порядка по пространству для этих уравнений. При каком условии она будет устойчивой, если  $\kappa_{TW} = 0$ ,  $\epsilon = 0$ .

25. Почему при увеличении содержания углекислого газа в атмосфере в тропосфере происходит потепление, а в стратосфере и мезосфере - похолодание?

26. Почему запущенный с поверхности Земли воздушный шар, как правило, при подъеме поворачивает направо (в северном полушарии)?

27. Как выглядят бароклинные волны у поверхности в северном полушарии? Что изменится, если рассмотреть бароклинные волны в южном полушарии. Будут ли максимумы и минимумы давления, связанные с бароклинными волнами в южном полушарии, сдвигаться с высотой к востоку, или к западу?

28. Почему летом в Казахстане температура днем нередко достигает  $40^{\circ}\text{C}$ , а на той же широте при такой же солнечной погоде на Украине такая температура крайне редка?

29. Ослабляется или усиливается циркуляция Уокера во время повышения температуры на востоке Тихого океана (при Эль-Ниньо)? Как вы думаете, почему события, аналогичные Эль-Ниньо, не происходят в Индийском океане?

30. Выполняется ли какой-нибудь закон сохранения для уравнения



которое решается в области  $x \in [0;1]$ ,  $y \in [0;1]$  с граничными условиями  $T(x=0) = T(x=1)$  и  $T(y=0)=T(y=1)=T_0$ ? Напишите конечно-разностную схему для этого уравнения, в которой выполнялся бы конечно-разностный аналог этого закона.

#### 4. Критерии оценивания

Оценка	Баллы	Критерии
отлично	10	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.
	9	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.
	8	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

хорошо	7	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.
	6	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.
	5	Выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.
удовлетворительно	4	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.
	3	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.
неудовлетворительно	2	Выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.
	1	Выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Во время проведения экзамена зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Экзамен проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.