

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
Географический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета, профессор, д.г.н.

В.З.Макаров
"14" _____ 2021 г

Рабочая программа дисциплины
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

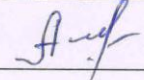
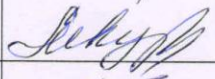
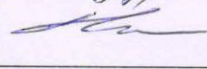
Направление подготовки
05.04.05 Прикладная гидрометеорология

Профиль подготовки
Метеорология и климатология

Квалификация (степень) выпускника
Магистр

Форма обучения
Очная

Саратов,
2021

Статус	ФИО	Подпись	Дата
Преподаватель-разработчик	Алимпиева М.А.		11.05.21
Председатель НМК	Кудрявцева М.Н.		11.05.21
Заведующий кафедрой	Червяков М.Ю.		11.05.21
Специалист Учебного управления			

1. Цели освоения дисциплины «Гидродинамическое моделирование природных процессов»

Целью освоения дисциплины «Гидродинамическое моделирование природных процессов» является ознакомление магистров прикладной гидрометеорологии с современными методами гидродинамического моделирования атмосферных процессов, основанными на интегрировании системы уравнений гидротермодинамики атмосферы, с целью краткосрочного и среднесрочного предсказания погоды. В процессе обучения они должны познакомиться с физической и математической постановкой задач гидродинамического моделирования процессов синоптического масштаба на основе полных и упрощенных уравнений гидротермодинамики атмосферы. Изучить конечно-разностные и спектральные модели, методы численного интегрирования прогностических уравнений, методы параметризации физических процессов подсеточного масштаба, а также лучшие современные оперативные прогностические гидродинамические модели атмосферы и модели общей циркуляции атмосферы и океана, используемые для предсказания изменений климата.

Основной задачей изучения дисциплины является развитие навыков самостоятельного решения теоретических и прикладных задач в области гидродинамического моделирования природных процессов с применением современных вычислительных методов и устройств.

В результате изучения дисциплины магистры должны быть подготовлены к решению профессиональных задач гидродинамического моделирования. Полученные знания могут использоваться ими при проведении мониторинга природной среды, анализе и прогнозе состояния атмосферы, вод суши и Мирового океана, оценке их возможного изменения, вызванного естественными и антропогенными причинами.

2. Место дисциплины «Гидродинамическое моделирование природных процессов» в структуре ООП

Дисциплина «Гидродинамическое моделирование природных процессов» входит в состав базовой части Блока Б1 «Дисциплины (модули)» и читается на втором курсе (3 семестр). Изучение дисциплины базируется на знаниях студентов, полученных в результате освоения курсов «Математика», «Физика», «Геофизическая гидродинамика», «Динамическая метеорология» и «Численные методы математического моделирования атмосферных процессов».

3. Результаты обучения по дисциплине «Гидродинамическое моделирование природных процессов»

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
<p>ОПК-3. Способен реализовывать задачи исследования, выполнять экспериментальные работы, проводить исследования с применением знаний фундаментальных и прикладных дисциплин в области Наук о Земле, интерпретировать и представлять результаты исследования</p>	<p>1.3_М.ОПК-3. Способен проводить исследование на основе численных моделей.</p>	<p>Знать: структуру дисциплины «Гидродинамическое моделирование природных процессов», историю ее развития; основные уравнения, описывающие движение атмосферы и протекающие в ней термодинамические процессы; основные численные методы, используемые при решении системы уравнений гидротермодинамики земной атмосферы; методы параметризации процессов подсеточного масштаба, влияющих на состояние атмосферы. Уметь: формулировать задачи гидродинамического моделирования природных процессов на языке дифференциальных уравнений, используя законы механики сплошной среды и термодинамики; применять методы аппроксимации систем дифференциальных уравнений в частных производных конечными разностями и спектральные модели; использовать численные методы решения прогностических уравнений; Владеть: навыками самостоятельной работы со специальной литературой; навыками работы с базами данных метеорологических наблюдений и</p>

		климатических характеристик; методами решения системы уравнений гидротермодинамики атмосферы; методами решения задач параметризации природных процессов.
--	--	--

4. Структура и содержание дисциплины «Гидродинамическое моделирование природных процессов»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 часа.

№ п/п	Разделы дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Формы промежуточной аттестации (по семестрам)
				лекции	Практические занятия		КСР	
					Общая трудоемкость	Из них – практическая подготовка		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Введение. Важность гидродинамического моделирования в метеорологии и климатологии.	3	1	2	-	-	4	Устный контроль
2	Основные уравнения гидротермодинамики атмосферы.	3	2	2	2	-	8	Устный контроль.
3	Учет влияния турбулентной вязкости.	3	3	-	-	-	8	Устный контроль.
4	Глобальная модель земной атмосферы.	3	4	-	-	-	8	Устный контроль. Письменный контроль
5	Описание вертикальной структуры атмосферы.	3	5	-	2	-	8	Письменный контроль
6	Конечно-разностная аппроксимация уравнений.	3	6-7	2	2	-	12	Устный контроль.
7	Спектральные прогностические модели.	3	8-9	2	2	-	10	Устный контроль. Письменный контроль.
8	Параметризация атмосферных процессов.	3	10-11	2	2	-	8	Устный контроль.
9	Современные гидродинамические модели.	3	12-13	2	2	-	10	Устный контроль.
10	Ансамблевый прогноз	3	14	2	2	-	4	Устный контроль

Всего:			14	14	-	80	Зачет
--------	--	--	-----------	-----------	---	-----------	-------

1 Введение. Важность гидродинамического моделирования в метеорологии и климатологии

История применения методов гидродинамического моделирования для прогноза погоды. Классификация моделей прогноза погоды. Глобальные, региональные и мезомасштабные модели. Точность современных методов прогноза. Модели общей циркуляции атмосферы и океана.

2 Основные уравнения гидротермодинамики атмосферы

Векторная запись уравнений гидротермодинамики атмосферы. Декартова система координат, используемая в метеорологии. Система уравнений гидротермодинамики атмосферы в декартовой системе координат. Замкнутость системы. Необходимость начальных и граничных условий.

3 Учет влияния турбулентной вязкости

Роль молекулярной и турбулентной вязкости в динамике атмосферы. Правила осреднения Рейнольдса. Уравнения движения Рейнольдса. Система уравнений гидротермодинамики атмосферы при учете турбулентной вязкости.

4 Глобальная модель земной атмосферы

Сферическая система координат. Формулы перехода от декартовой системы к сферической и от сферической системы координат к декартовой. Разложение ортов сферической системы по векторам декартового базиса. Зависимость направления ортов сферической системы координат от положения точки. Формулы Френе. Радиус-вектор, векторы скорости, ускорения и ускорения Кориолиса в сферической системе координат. Градиент, дивергенция, ротор и оператор Лапласа в сферической системе координат. Выражение для оператора индивидуальной производной в сферической системе координат. Полная и упрощенная система уравнений гидротермодинамики атмосферы в сферической системе координат.

5 Описание вертикальной структуры атмосферы

Введение отношения давления к поверхностному давлению как новой вертикальной координаты. Уравнение горизонтальных движений в сигма представлении. Уравнение неразрывности в сигма представлении. Упрощенная система уравнений гидротермодинамики атмосферы в сферической системе координат и сигма представлении.

6 Конечно-разностная аппроксимация уравнений

Конечно-разностная аппроксимация производных. Разности, направленные вперед и назад. Центральные разности. Порядок аппроксимации. Конечно-разностная аппроксимация производных второго порядка. Точность аппроксимации производных второго порядка. Конечно-разностная аппроксимация оператора Лапласа. Оценка точности аппроксимации производных для волновых процессов. Условия аппроксимации, корректности и устойчивости. Формулировка теоремы Лакса. Критерий Куранта – Фридрихса – Леви. Построение конечно-разностной схемы для неоднородного уравнения адвекции. Учет начальных и граничных условий. Сведение задачи к решению системы линейных алгебраических уравнений.

7 Спектральные прогностические модели

Собственные функции и собственные значения линейного оператора в декартовой системе координат. Ряд Фурье. Представление пространственного распределения метеорологических характеристик усеченным рядом Фурье. Спектральные прогностические модели. Построение определяющей системы уравнений с использованием метода наименьших квадратов. Сферические функции и их основные свойства. Зональные, меридианальные и тессеральные гармоники. Ортогональность и полнота системы сферических функций. Возможные виды усечения ряда Фурье. Глобальная спектральная прогностическая модель.

8 Параметризация атмосферных процессов

Возможность учета влияния процессов подсеточного масштаба с помощью процедур параметризации. Теоретические основы параметризации процессов турбулентного обмена. Полуэмпирические модели турбулентности. Получение выражений для нелинейных членов в уравнениях движения Рейнольдса. Параметризация мелкомасштабной и среднемасштабной турбулентности. Параметризация лучистого теплообмена. Понятие интенсивности излучения. Уравнение переноса излучения и его общее решение. Коротковолновая и длинноволновая радиация в атмосфере. Модель Шварцшильда – Эмдена. Учет влияния облачности.

9 Современные гидродинамические модели

Обзор глобальных моделей атмосферы: модель атмосферы Национального управления по атмосфере и океану (NOAA) GFS, модель атмосферы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) IFS. Модели Госкомгидромета РФ. Модели общей циркуляции атмосферы и океана, используемые для предсказания изменений климата.

10 Ансамблевый прогноз

Понятие ансамбля прогнозов, его организация в различных центрах. Бридинг. Мультимодельные ансамбли в прогнозировании погоды и их преимущества перед другими подходами.

Перечень практических работ по дисциплине «Гидродинамическое моделирование природных процессов»

1. Получение формул перехода от декартовой системы координат к сферической системе координат и от сферической системы координат к декартовой системе координат. Запись разложения ортов сферической системы по векторам декартового базиса.

2. Получение выражений для радиус-вектора, вектора скорости, вектора ускорения и вектора ускорения Кориолиса в сферической системе координат.

3. Получение выражения для градиента и дивергенции в сферической системе координат.

4. Оценка значения производной и определенного интеграла от метеорологической характеристики в узлах сетки, используя конечно-разностную аппроксимацию. Сравнение этих оценок с точным значением, при условии, что величина изменяется по параболическому закону.

5. Запись конечно-разностной схемы для однородного уравнения адвекции с заданными начальным и граничным условиями.

6. Получение уравнения адвекции спектральным методом.

7. Запись уравнений плоскопараллельных потоков для длинноволновой и восходящей радиации.

5. Образовательные технологии, применяемые при освоении дисциплины «Гидродинамическое моделирование природных процессов»

С целью реализации компетентного подхода предусматривается широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий: постановка вопросов перед аудиторией, дополнение ответов другими участниками, кейс-методы, ролевые интеллектуальные игры, виртуальные лаборатории, мультимедийные компьютерные программы.

При реализации учебной дисциплины используются различные формы визуализации наглядного материала. При выполнении практических работ в течение семестра студенты овладевают математическим аппаратом гидродинамического моделирования, получают выражения для основных векторов и дифференциальных операторов в сферической системе координат, изучают сигма-представление, метод сеток и спектральные прогностические модели.

При проведении занятий с инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья они могут не вызываться к доске, а отвечать на

устные вопросы с места. Лицам с затруднениями речи могут даваться индивидуальные задания с последующими письменными ответами.

По всему изучаемому материалу предусматривается проведение индивидуальных и групповых консультаций.

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

Самостоятельная работа студентов включает в себя:

- 1) изучение основной литературы, публикаций в научных и научно-популярных периодических изданиях;
- 2) подготовка к тестовому контролю;
- 3) написание рефератов;
- 4) Подготовка к сдаче теоретического экзамена.

Тестовые задания для проведения текущего контроля по дисциплине «Гидродинамическое моделирование природных процессов»:

1. Для среднесрочного прогноза погоды необходимо использовать:

1. глобальные модели;
2. мезомасштабные модели;
3. региональные модели;

Верный вариант: 1.

2. Для краткосрочного прогноза погоды необходимо использовать:

1. глобальные модели;
2. мезомасштабные модели;
3. региональные модели;

Верный вариант: 2.

3. Ось OX стандартной декартовой системы координат направлена:

1. на запад;
2. на восток;
3. на север;
4. на юг;
5. вертикально вверх.

Верный вариант: 2.

4. Ось OZ стандартной декартовой системы координат направлена:

1. на запад;
2. на восток;
3. на север;

4. на юг;
 5. вертикально вверх.
- Верный вариант: 5.

5. Число уравнений в системе уравнений гидротермодинамики атмосферы равно:

1. двум;
2. трем;
3. четырем;
4. шести;
5. семи.

Верный вариант: 5.

6. Формулы Френе описывают:

1. производные компонент ускорения Кориолиса в сферической системе координат;
 2. производные компонент скорости в сферической системе координат;
 3. производные компонент ускорения в сферической системе координат;
 4. производные ортов сферической системы координат;
- Верный вариант: 4.

7. Вектор горизонтальной скорости в общепринятых обозначениях имеет координаты:

1. u и w ;
2. v и w ;
3. x , y и z ;
4. u и v ;

Верный вариант: 4.

8. Значение вертикальной переменной σ на земной поверхности равно:

1. 0;
2. 1;
3. 0.5;
4. 2;

Верный вариант: 2.

9. Значение вертикальной скорости $\dot{\sigma}$ на земной поверхности равно:

1. 0;
2. 1;
3. 0.5;
4. 2;

Верный вариант: 1.

10. Порядок аппроксимации производной разностью направленной вперед равен:

1. 0;
2. 1;
3. 0.5;
4. 2;

Верный вариант: 2.

11. Порядок аппроксимации производной центральной разностью равен:

1. 0;
2. 1;
3. 0.5;
4. 2;

Верный вариант: 4.

12. Число узлов сетки на длине волны синусоиды должно быть не менее:

1. одного;
2. двух;
3. трех;
4. четырех;

Верный вариант: 4.

13. Собственными функциями линейного оператора в пространстве являются:

1. линейные функции;
2. комплексные экспоненты;
3. сферические гармоники;
4. функции Бесселя;

Верный вариант: 2.

14. Собственными функциями линейного оператора на сфере являются:

1. линейные функции;
2. комплексные экспоненты;
3. сферические гармоники;
4. функции Бесселя;

Верный вариант: 3.

15. Разложение в ряд Фурье проводится по системе функций:

1. не полной;
2. полной;
3. полной и ортогональной;
4. ортогональной;

Верный вариант: 3.

16. Критерий сходимости решения разностной схемы для системы линейных дифференциальных уравнений в частных производных к точному решению устанавливается:

1. теоремой Коши-Адамара;
2. теоремой Лакса;
3. теоремой Фурье;
4. правилом Лопиталья;

Верный вариант: 2.

18. Индекс m зональной сферической гармоники $Y_n^m(\lambda, \mu)$ равен:

1. 1;
2. 0;
3. n ;
4. -3 ;
5. $-m$

Верный вариант: 2.

19. Индекс m секториальной сферической гармоники $Y_n^m(\lambda, \mu)$ равен:

1. 1;
2. 0;
3. n ;
4. -3 ;
5. $-m$

Верный вариант: 3.

20. В разложение единичного модельного прогноза не входит компонента:

1. часть прогноза, положительно коррелируемая (в многолетнем ходе) с наблюдениями;
2. смещение климата модели относительно наблюдаемого климата;
3. ошибка, присущая модели;
4. часть прогноза, отрицательно коррелируемая (в многолетнем ходе) с наблюдениями.

Верный вариант: 4.

Темы рефератов:

1. Обзор некоторых локальных моделей прогноза погоды.
2. Метод сеток в численном прогнозе погоды.
3. Джон фон Нейман и его метеорологический проект.
4. Параметризация лучистого теплообмена на основе гипотезы Ньютона.

Ньютона.

5. Постановка задачи гидродинамического прогнозирования спектральным методом.

Контрольные вопросы для проведения промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины «Гидродинамическое моделирование природных процессов»:

1. Почему для среднесрочных прогнозов погоды необходимы глобальные модели?
2. Что такое начальные условия?
3. Какая система уравнений называется замкнутой?
4. Какие существуют виды граничных условий?
5. Какие условия необходимо добавить к системе уравнений?
6. Каковы принципиальные отличия сферической системы координат от декартовой?
7. Почему в формулах Френе все производные базисных ортов сферической системы координат по радиусу равны нулю?
8. В чем выгода использования в задачах гидродинамического прогноза сигма представления?
9. Чему равна вертикальная скорость в сигма представлении на границах атмосферы?
10. Почему в некоторых уравнениях можно пренебречь вертикальными движениями воздуха?
11. Какой порядок аппроксимации интеграла обеспечивает правило трапеций?
12. Какой порядок аппроксимации интеграла обеспечивает формула Симпсона?
13. Какое требование налагается на число узлов при применении формулы Симпсона?
14. Во сколько раз уменьшится погрешность конечно-разностной аппроксимации производной центральной разностью, если величину шага сетки уменьшить вдвое?
15. Гарантирует ли сходимость по норме пространства L_2 также и сходимость по норме пространства $C_{[a,b]}$?
16. Какой оператор называется линейным?
17. Приведите примеры линейных операторов.
18. Какие функции являются собственными функциями линейного оператора на плоскости?
19. Какие функции являются собственными функциями линейного оператора на сфере?
20. Сколько индексов имеет сферическая гармоника и как они называются?
21. Что такое ансамблевый прогноз?

7. Данные для учета успеваемости студентов в БАРС

Таблица 1. Таблица максимальных баллов по видам учебной деятельности.

1	2	3	4	5	6	7	8
Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Самостоятельная работа	Автоматизированное тестирование	Другие виды учебной деятельности	Промежуточная аттестация	Итого
14	0	28	20	0	8	30	100

Программа оценивания учебной деятельности студента

Лекции

Посещаемость лекций в течение одного семестра от 0 до 14 баллов

0 баллов – отсутствие на лекции,

1 балла – присутствие на лекции,

2 балла – присутствие и активное участие в проведении занятия.

Лабораторные занятия не предусмотрены

Практические занятия

Посещаемость практических занятий в течение одного семестра от 0 до 28 баллов

0 баллов – отсутствие на практическом занятии,

2 балла – присутствие на практическом занятии,

4 баллов – присутствие и выполнение задания практического занятия.

Самостоятельная работа

Представление реферативных работ – от 0 до 20 баллов

0 баллов – отсутствие реферата

5 балл – предоставление реферата в письменной форме

10 баллов – представление реферата в устной форме

15 балла – представление реферата в устной форме с использованием презентации

20 баллов - представление реферата в устной форме (с презентацией или без), ответы на дополнительные вопросы

Автоматизированное тестирование не предусмотрено

Другие виды учебной деятельности – от 0 до 8 баллов

Тестовый опрос – от 0 до 8 баллов,

4 баллов – ответ на 10 тестов, есть ошибки,

8 баллов – правильный ответ на все тесты.

Промежуточная аттестация

25-30 баллов – ответ на «отлично»

19-24 баллов – ответ на «хорошо»

13-18 баллов – ответ на «удовлетворительно»

0-12 баллов – неудовлетворительный ответ

Таким образом, максимально возможная сумма баллов за все виды учебной деятельности магистра за 3 семестр по данной дисциплине составляет 100 баллов.

Таблица 2. Пересчет полученной магистром суммы баллов по дисциплине «Гидродинамическое моделирование природных процессов»

16-30 баллов	«зачтено»
0-15 баллов	«не зачтено»

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Гидродинамическое моделирование природных процессов»

а) литература:

1. Толстых М.А. Модели глобальной атмосферы и Мирового океана: алгоритмы и суперкомпьютерные технологии: учебное пособие. - М.: Издательство Московского университета, 2013. - 136 с.
2. Головизин В.М. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. - М.: Издательство Московского университета, 2013. - 467 с.
3. Шакина Н.П. Лекции по динамической метеорологии. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2013. – 160 с. (3 экз. на кафедре)
4. Клёмин В.В., Кулешов Ю.В., Суворов С.С., Волконский Ю.Н. Динамика атмосферы. СПб.: Наука, 2013. – 421 с. (30 экз. на кафедре)
5. Белов П.Н. Сборник упражнений по численным методам прогноза погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1980. (2 экз. на кафедре).
6. Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Едиториал УРСС. 2005. 383 с.
7. Самарский А.А. Введение в численные методы: учеб. пособие для вузов. СПб.:Лань, 2005. 288 с.

б) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

1. <http://elibrary.ru/issues.asp?id=7892> – сервер журнала «Метеорология и гидрология».
2. http://www.ph4s.ru/book_pc_chisl.html - электронная библиотека книг и учебников по численным методам, созданная А.Н. Варгиным.
3. http://www.ph4s.ru/book_pc_model.html - электронная библиотека книг и учебников по компьютерному моделированию, созданная А.Н. Варгиным.
4. <http://method.hydromet.ru/model/tolstih/tolstih.html> - статья Толстых М.А. Глобальная гидродинамическая полулагранжева модель прогноза погоды ПЛАВ 2005 в версии с постоянным разрешением.
5. <http://method.hydromet.ru/model/tolstih4/tolstih4.html> - статья Толстых М.А., Шляева А.В., Богословский Н.Н., Фадеев Р.Ю. Глобальный прогноз полей метеорологических элементов на стандартных изобарических поверхностях свободной атмосферы, поля давления на уровне моря заблаговременностью 1-10 суток, приземных полей температуры воздуха и ветра на сроки до 120 ч и полей осадков на сроки до 72 ч на основе модели ПЛАВ–2008.
6. http://ksv.inm.ras.ru/GCM_DATA_PLOTTING/GCM_INM_DATA.html - сервер Института вычислительной математики РАН, содержащий информацию о модели общей циркуляции атмосферы и океана.
7. Microsoft Word

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

1. Компьютеры, подключенные к сети Интернет, для работы с базами данных и электронными библиотеками. Компьютерные программы.
2. Конспекты лекций.
2. Таблицы, схемы, графики, справочники.
3. Учебно-методические пособия и другая справочная литература кафедры метеорологии и климатологии.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 05.04.05 Прикладная гидрометеорология и профилю Метеорология и климатология.

Автор: Алимбиева М.А., ассистент кафедры метеорологии и климатологии географического факультета СГУ.

Программа одобрена на заседании кафедры метеорологии и климатологии от 11.05.2021 года, протокол № 7.