

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра метеорологических прогнозов

Рабочая программа дисциплины
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основная профессиональная образовательная программа
высшего образования по направлению подготовки

05.03.04«Гидрометеорология»

Направленность (профиль)

Метеорология

Уровень:

Бакалавриат

Форма обучения

Очная

Согласовано
Руководитель ОПОП
«Гидрометеорология»

_____ Абанников В.Н.

Председатель УМС РГГМУ

_____ Палкин И.И.

Рекомендовано решением
Учебно-методического совета РГГМУ

_____ 19 _____ мая _____ 2021 _____ г., протокол № _____ 8 _____

Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры
Метеорологических прогнозов

_____ 4 _____ мая _____ 2021 _____ г., протокол № _____ 9 _____

Зав. кафедрой _____ Анискина О.Г.

Авторы-разработчики:

_____ Анискина О.Г.

1. Цель и задачи освоения дисциплины

Цель освоения дисциплины— подготовка бакалавров, владеющих знаниями в объеме, необходимом для глубокого понимания принципов использования численных методов для решения задач, встречающихся в оперативной и исследовательской гидрометеорологической практике, в том числе в задачах гидродинамического прогноза погоды.

Задачи:

- освоение методов численного дифференцирования и интегрирования для применения при разработке и использовании гидродинамических моделей атмосферы;
- освоение численных методов подготовки гидрометеорологических данных;
- формирование навыков применения численных методов для решения оперативных практических и научно-исследовательских гидрометеорологических задач.

2. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы

Дисциплина «Численные методы математического моделирования» для направления подготовки 05.03.04 – Гидрометеорология, профиль – Метеорология относится к дисциплинам обязательной части.

Дисциплина изучается в 7 семестре очного обучения.

Для освоения данной дисциплины, обучающиеся должны освоить разделы дисциплин: «Физика», «Программирование», «Математика», «Гидромеханика», «Компьютерные технологии в метеорологических исследованиях».

Параллельно с дисциплиной «Численные методы математического моделирования» изучаются: «Геоинформатика», «Дополнительные главы климатологии».

Результаты освоения дисциплины «Численные методы математического моделирования» будут использованы при освоении дисциплин «Подготовка данных для математического моделирования», «Подготовка данных для математического моделирования», «Вихревая динамика».

3. Перечень планируемых результатов обучения

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование компетенций:

ПК-2.1, ПК-5.1

Таблица 2.

Профессиональные компетенции

Код и наименование общепрофессиональной компетенции	Код и наименование индикатора достижения общепрофессиональной компетенции	Результаты обучения
ПК-2. Способен анализировать явления и процессы природной среды, выявлять их закономерности	ПК-2.1 -Осуществляет анализ явлений и процессов, происходящих в природной среде, на основе данных наблюдений, экспериментальных и модельных данных	<i>Знать:</i> - Численные методы, используемые для моделирования атмосферных процессов; <i>Уметь:</i> - Использовать численные методы для обработки результатов гидродинамического моделирования атмосферных процессов; <i>Владеть:</i> - Навыками применения

		<i>численных методов при решении гидрометеорологических задач.</i>
ПК-5 Способен определять будущее состояние параметров атмосферы, ее влияние на природу и отрасли народного хозяйства	ПК-5.2Верифицирует составленные прогнозы	<i>Знать:</i> - Методы, используемые для оценки гидродинамических прогнозов; <i>Уметь:</i> - Оценивать качество гидродинамических прогнозов; <i>Владеть:</i> - Навыками применения оценки результатов гидродинамического моделирования.

4. Структура и содержание дисциплины

4.1. Объем дисциплины

Объем дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 академических часа.

Таблица 4.

Объем дисциплины по видам учебных занятий в академических часах, 2021 год набора

Объем дисциплины	Всего часов
	Очная форма обучения
Объем дисциплины	144
Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам аудиторных учебных занятий) – всего:	56
в том числе:	-
лекции	28
занятия семинарского типа:	
практические занятия	
лабораторные занятия	28
Самостоятельная работа (далее – СРС) – всего:	88
в том числе:	-
контрольная работа	
Вид промежуточной аттестации	Экзамен 7 семест

4.2. Структура дисциплины

Таблица 5.

Структура дисциплины для очной формы обучения

№	Раздел / тема дисциплины	Семестр	Виды учебной работы, в т.ч. самостоятельная работа студентов, час.			Формы текущего контроля успеваемости	Формируемые компетенции	Индикаторы достижения компетенций
			Лекции	Лабораторные занятия	СРС			
1	<u>Математическое моделирование атмосферных процессов</u>	7	2	0	6	вопросы на лекции	ПК-2, ПК-5	ПК-2.1,ПК-5.2
2	<u>Метод сеток. Конечно-разностные аналоги производных. Специальные методы численного дифференцирования</u>	7	8	6	20	Вопросы на лекции, опрос перед выполнением лабораторной работы, отчёт по лабораторной работе	ПК-2, ПК-5	ПК-2.1,ПК-5.2
3	<u>Спектральные методы решения уравнений гидродинамики атмосферы. Метод конечных элементов/объёмов</u>	7	4	6	20	Вопросы на лекции	ПК-2, ПК-5	ПК-2.1,ПК-5.2
4	<u>Методы интегрирования уравнений гидродинамики атмосферы</u>	7	6	10	10	Вопросы на лекции, опрос перед выполнением лабораторной работы, отчёт по лабораторной работе	ПК-2, ПК-5	ПК-2.1,ПК-5.2
5	<u>Постановка начальных и</u>	7	2	2	12	Вопросы на лекции, опрос	ПК-2, ПК-5	ПК-2.1,ПК-5.2

	<u>граничных условий</u>					перед выполнением лабораторной работы, отчёт по лабораторной работе		
6	<u>Описание физических процессов в гидродинамических моделях атмосферы</u>	7	2	4	10	Вопросы на лекции, опрос перед выполнением лабораторной работы, отчёт по лабораторной работе	ПК-2, ПК-5	ПК-2.1, ПК-5.2
7	<u>Современные гидродинамические модели атмосферы</u>		2	0	6	Вопросы на лекции	ПК-2, ПК-5	ПК-2.1, ПК-5.2
8	<u>Интерпретация результатов гидродинамического прогноза погоды</u>		2	0	4	Вопросы на лекции	ПК-2, ПК-5	ПК-2.1, ПК-5.2
	ИТОГО	-	28	28	88	-	-	-

4.3. Содержание разделов дисциплины

4.2.1 Математическое моделирование атмосферных процессов

Модель и моделирование. История возникновения и развития гидродинамических прогнозов погоды. Место гидродинамических прогнозов в оперативной метеорологической службе. Гидродинамическое прогнозирование в России и за рубежом. Перспективы гидродинамических прогнозов погоды.

Многомасштабность атмосферных процессов и их классификация. Погодообразующие процессы и метеорологические шумы. Замкнутая система уравнений гидротермодинамики атмосферы и её особенности.

4.2.2 Метод сеток. Конечно-разностные аналоги производных, Специальные методы численного дифференцирования

Основы метода сеток. Дискретизация пространства и времени. Равномерные и неравномерные сетки. Конечно-разностные аналоги производных. Ошибка аппроксимации производных, порядок точности, вязкость, согласованность, устойчивость, сходимоть, дисперсионные свойства.

Анализ ошибки аппроксимации, порядка точности, вычислительной вязкости, согласованности, устойчивости конечно-разностных схем на примере линейного уравнения адвекции. Сравнительный анализ устойчивости различных конечно-разностных схем.

Повышение порядка точности аппроксимации производных. Монотонные схемы. Квазимоноотонные схемы. Схема "Кабаре".

4.2.3 Спектральные методы решения уравнений гидродинамики атмосферы Метод конечных элементов/объёмов

Основы спектрального подхода к решению уравнений гидродинамики атмосферы. Базисные функции, используемые в атмосферных моделях. Тригонометрические функции как базисные функции. Сферические функции. Полиномы Лежандра. Разложение полей в ряд. Спектральная форма уравнений. Методы минимизации невязки. Метод коэффициентов взаимодействия. Спектрально-сеточное преобразование. Псевдоспектральный метод. Решение диагностических уравнений.

Основы метода конечных элементов. Базисные функции, используемые в методе конечных элементов. Форма уравнений, используемая в методе спектральных элементов.

4.2.4 Методы интегрирования уравнений гидродинамики атмосферы

Линейное уравнение адвекции. Точное решение уравнения адвекции. Принципиальная схема прогноза. Различные способы аппроксимации. Явные, полунявные и неявные схемы интегрирования уравнений модели. Уравнение Гельмгольца. Использование переменных Эйлера и Лагранжа для описания адвекции. Метод расщепления по физическим процессам. Прогностический алгоритм интегрирования уравнений при помощи матричных операторов.

Явные, неявные, полунявные схемы интегрирования. Двухуровневые и трёхуровневые схемы интегрирования по времени. Одношаговые и многошаговые схемы интегрирования. Схемы типа «предиктор-корректор». Принципиальная схема прогноза по явной схеме интегрирования. Принципиальная схема прогноза по неявной схеме интегрирования. Метод итераций. Метод прогонки. Физические и вычислительные начальные условия.

Бокс метод: вывод уравнений, достоинства, недостатки, граничные условия.

Метод расщепления: основные положения, принципиальная схема прогноза, достоинства, недостатки, ограничения на использование.

4.2.5 Постановка начальных и граничных условий

Постановка начальных и граничных условий. Ассимиляция. Фиктивные граничные условия. Граничные условия излучения. Прозрачные граничные условия.

4.2.6 Описание физических процессов в гидродинамических моделях атмосферы

Проблема описание неадиабатических процессов в гидродинамических моделях атмосферы. Параметризация физических процессов. Параметризация конвекции. Параметризация радиационных процессов. Параметризация турбулентности. Параметризация фазовых переходов. Гидрологический цикл. Модель океана. Совместные модели. Бесшовные модели.

4.2.7 Современные гидродинамические модели атмосферы

Современные глобальные гидродинамические модели атмосферы (GFS, IFS, UM, ICON, PLAV). Современные региональные модели атмосферы (COSMO, WRF-ARW). Современные модели климата (CAM5, CESM1, AM3, ИВМ РАН, ГГО им.А.И.Воейкова). Постановка начальных и граничных условий. Ассимиляция. Фиктивные граничные условия. Граничные условия излучения. Прозрачные граничные условия.

4.2.8 Интерпретация результатов гидродинамического прогноза погоды

Статистическая коррекция результатов моделирования. Динамическая коррекция гидродинамических прогнозов. Ансамблевый прогноз и его интерпретация.

4.4. Содержание лабораторных занятий

Таблица 11.

Содержание лабораторных занятий для очной формы обучения

№ темы/дисциплины	Тематика лабораторных занятий	Всего часов	В том числе часов практической подготовки
2	<u>№ 1 Сравнительный анализ ошибок аппроксимации производных конечно-разностными аналогами.</u>	2	2
2	<u>№ 2 Использование конечно-разностных аналогов высокого порядка точности для аппроксимации производных</u>	2	2
2	<u>№ 3 Расчёт полей метеорологических величин с использованием конечно-разностных аналогов производных</u>	2	2
3	<u>№ 4 Разложение функции в ряд по экспоненте.</u>	2	2
3	<u>№ 5 Оценка сходимости разложения функции в ряд</u>	2	2
3	<u>№ 6 Расчёт сферических функций</u>	2	2
4	<u>№ 7 Решение линейного уравнения адвекции с использованием различных конечно-разностных аналогов.</u>	2	2
4	<u>№ 8 Решение линейного уравнения адвекции с использованием различных схем интегрирования</u>	2	2
4	<u>№ 9 Решение нелинейного уравнения адвекции с использованием метода сеток</u>	2	2
4	<u>№ 10 Решение линейного уравнения адвекции спектральным методом</u>	2	2
4	<u>№ 11 Решение нелинейного уравнения адвекции спектральным методом</u>	2	2
5	<u>№ 12 Анализ влияния граничных условий на качество интегрирования уравнений</u>	2	2
6	<u>№ 13 Разработка схемы параметризации</u>	2	2
6	<u>№ 14 Верификация схемы параметризации</u>	2	2

5. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

В течение семестра студент обязан самостоятельно прорабатывать материал, изложенный на лекциях, для чего рекомендуется использовать сделанные на лекциях конспекты, изучить основную и дополнительную литературу. Дополнительно к лекционным и практическим занятиям студент может приходить на консультации с преподавателем, для чего студент может использовать возможности удаленного доступа (Интернет).

6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

Учет успеваемости обучающегося по дисциплине осуществляется по 100-балльной шкале. Максимальное количество баллов по дисциплине за один семестр – 100:

- максимальное количество баллов за выполнение всех видов текущего контроля - 60;
- максимальное количество баллов за посещение лекционных занятий - 10;
- максимальное количество баллов за прохождение промежуточной аттестации - 30;

6.1. Текущий контроль

6.1.1. Вопросы на лекции. Студентам предлагаются вопросы по каждому разделу с последующим их домашним анализом и письменными ответами на следующей лекции.

6.1.2. Решение задач по разделам. Студентам предлагаются задачи для домашнего решения и последующей проверки.

6.1.3. Беседа со студентами (коллоквиум) перед выполнением каждой лабораторной работы.

6.1.4. Прием и проверка отчета по каждой лабораторной работе.

6.1.5. Студентам выдаётся индивидуальное задание с последующей проверкой и допуском к зачёту.

6.2. Промежуточная аттестация

Форма промежуточной аттестации по дисциплине – экзамен.

Форма проведения экзамена устно по билетам

Перечень вопросов для подготовки к экзамену:

ПК-2, ПК-5

1. Понятие модели и математического моделирования.
2. Методсеток: основныеположения.
3. Конечно-разностныеаналогипроизводных.
4. Ошибкааппроксимациипроизводных.
5. Порядокточностиаппроксимациипроизводных.
6. Вычислительнаявязкость.
7. Согласованностьконечно-разностныхсхем.
8. Повышение порядка точности аппроксимации производных.
9. Линейное уравнение адвекции: принципиальная схема прогноза.
10. Явные и неявные схемы интегрирования.
11. Двухуровневые и трёхуровневые схемы интегрирования по времени.
12. Одношаговые и многошаговые схемы интегрирования.
13. Принципиальная схема прогноза по явной схеме интегрирования.
14. Принципиальная схема прогноза по неявной схеме интегрирования.
15. Решение линейного уравнения адвекции аппроксимированного неявной схемой методом итераций.
16. Вычислительныемоды.
17. Физические и вычислительные начальные условия.
18. Устойчивость конечно-разностных схем интегрирования.
19. Анализ устойчивости двухуровневых схем методом Неймана.
20. Анализустойчивоститрёхуровневыхсхем.
21. Анализустойчивостинеявныхсхем.
22. Сравнительный анализ устойчивости схем с использованием центральных и направленных разностей.

23. Сравнительный анализ устойчивости явных и неявных схем интегрирования.
24. Анализ устойчивости двухшаговых схем.
25. Фазовая и групповая скорости. Вычислительная дисперсия.
26. Уравнение колебания. Аппроксимация различными конечно-разностными схемами.
27. Уравнение колебания. Анализ устойчивости методом Неймана.
28. Уравнение колебания. Анализ изменения фазы колебания. Нелинейная вычислительная неустойчивость.
29. Основные положения спектральных методов решения уравнений.
30. Базисные функции, используемые в задачах гидрометеорологии.
31. Получение определяющей системы уравнений для решения уравнений гидродинамики атмосферы.
32. Метод конечных элементов.
33. Метод конечных объёмов.
34. Монотонные схемы.
35. Описание адвекции в переменных Эйлера.
36. Описание адвекции в переменных Лагранжа.
37. Фильтрация шумов.
38. Сглаживание метеорологических полей.
39. Аппроксимации полей метеорологических величин.
40. Постановка начальных условий.
41. Параметризация физических процессов
ПК-5
42. Современные глобальные гидродинамические модели атмосферы (GFS, IFS, UM, ICON, PLAV).
43. Современные региональные модели атмосферы (COSMO, WRF-ARW). Современные модели климата (CAM5, CESM1, AM3, ИВМ РАН, ГГО им. А.И. Воейкова).
44. Постановка начальных и граничных условий.
45. Ассимиляция.
46. Обработка результатов гидродинамического моделирования в целях метеорологического обеспечения народного хозяйства.
47. Использование программных пакетов для обработки и визуализации результатов моделирования (GRADS, Ponoply, cdo).
48. Оценка качества гидродинамических прогнозов.
49. Статистическая коррекция результатов моделирования.

6.3. Балльно-рейтинговая система оценивания

Таблица 14.

Распределение баллов по видам учебной работы

Вид учебной работы, за которую ставятся баллы	Баллы
Посещение лекционных занятий	0-10
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №1	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №2	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №3	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №4	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №5	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №6	0-6
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №7	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №8	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №9	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №10	0-6
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №11	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №12	0-4

Выполнение и отчёт по лабораторной работе №13	0-4
Выполнение и отчёт по лабораторной работе №14	0-4
Промежуточная аттестация	30
ИТОГО	0-100

Минимальное количество баллов для допуска до промежуточной аттестации составляет 48 баллов при условии выполнения всех видов текущего контроля.

Таблица 16.

Балльная шкала итоговой оценки на экзамене

Оценка	Баллы
Отлично	85-100
Хорошо	65-84
Удовлетворительно	40-64
Неудовлетворительно	0-39

7. Методические рекомендации для обучающихся по освоению дисциплины

Методические рекомендации ко всем видам аудиторных занятий, а также методические рекомендации по организации самостоятельной работы, в том числе по подготовке к текущему контролю промежуточной аттестации представлены в Методических рекомендациях для обучающихся по освоению дисциплины «Численные методы решения гидрометеорологических задач».

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

8.1. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

1. Клемин, В.В. Динамика атмосферы Воен.-косм. акад. им. А.Ф. Можайского; В.В. Клёмин, Ю.В. Кулешов, С.С. Суворов, Ю.Н. Волконский ; [под общ. ред. С.С. Суворова и В.В. Клёмина]. - Санкт-Петербург: Наука, 2013. - 420 с.
2. Бахвалов, Н. С. Численные методы [Электронный ресурс] / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. - 7-е изд. (эл.). - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 636 с. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=365807>

Дополнительная литература

1. Репинская Р. П. , Анискина О. Г. Конечно-разностные методы в гидродинамическом моделировании атмосферных процессов. – СПб.: РГГМИ, 2001 http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-213172857.pdf
2. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982
3. Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. – М.: Наука, 1979
4. Белов Н. П., Борисенков Е. П., Панин Б. Д.. Численные методы прогноза погоды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-090589.pdf
5. Белов Н. П. Численные методы прогноза погоды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975.

8.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет"

1. Электронный ресурс NOAA National Centers For Environmental Information. Режим доступа: http://web.kma.go.kr/eng/biz/forecast_02.jsp
2. Электронный ресурс Met Office Numerical Weather Prediction models. Режим доступа: <http://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/unified-model/weather-forecasting>

3. Электронный ресурс Numerical Weather Prediction NWP. Режим доступа: <http://www.rmets.org/weather-and-climate/weather/numerical-weather-prediction-nwp>

8.3. Перечень программного обеспечения

1. windows 7 48818295 20.07.2011
2. office 2010 49671955 01.02.2012
3. windows 7 48130165 21.02.2011
4. office 2010 49671955 01.02.2012
5. windows 7 48130165 21.02.2011
6. office 2010 49671955 01.02.2012
7. GNUFortran - компилятор (свободно распространяемое программное обеспечение).
8. GRADS - система анализа и представления данных (свободно распространяемое программное обеспечение).

8.4. Перечень информационных справочных систем

1. Электронно-библиотечная система ГидроМетеоОнлайн. Режим доступа: <http://elib.rshu.ru>
2. Электронно-библиотечная система Знаниум. Режим доступа: <http://znanium.com>

8.5. Перечень профессиональных баз данных

1. Электронно-библиотечная система eLibrary;
2. База данных издательства SpringerNature;

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа – укомплектована специализированной (учебной) мебелью, набором демонстрационного оборудования, обеспечивающими тематические иллюстрации, соответствующие рабочим учебным программам дисциплины

Учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа - укомплектована специализированной (учебной) мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации, оснащенная компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспеченностью доступа к архиву метеорологических карт и наблюдений

1. **Учебная аудитория для групповых и индивидуальных консультаций** - укомплектована специализированной (учебной) мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации.
2. **Учебная аудитория для текущего контроля и промежуточной аттестации** - укомплектована специализированной (учебной) мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации.
3. **Помещение для самостоятельной работы** – укомплектовано специализированной (учебной) мебелью, оснащено компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечено доступом в электронную информационно-образовательную среду организации.

10. Особенности освоения дисциплины для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья

Обучение обучающихся с ограниченными возможностями здоровья при необходимости осуществляется на основе адаптированной рабочей программы с использованием специальных методов обучения и дидактических материалов, составленных с учетом особенностей психофизического развития, индивидуальных возможностей и состояния здоровья таких обучающихся (обучающегося).

При определении формы проведения занятий с обучающимся-инвалидом учитываются рекомендации, содержащиеся в индивидуальной программе реабилитации инвалида, относительно рекомендованных условий и видов труда.

При необходимости для обучающихся из числа инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья создаются специальные рабочие места с учетом нарушенных функций и ограничений жизнедеятельности.

11. Возможность применения электронного обучения и дистанционных образовательных технологий

Дисциплина может реализовываться с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.