

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Геологический факультет

УТВЕРЖДАЮ

и.о. декана Геологического факультета

чл.-корр. РАН _____/Н.Н.Ерёмин/

« ___ » _____ 20__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Компьютерное моделирование геологических процессов

Автор-составитель: Захаров В.С.

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

05.04.01 Геология

Направленность (профиль) ОПОП:

Геология и полезные ископаемые (ММ)

Форма обучения:

Очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена

Учебно-методическим Советом Геологического факультета

(протокол № _____, _____)

Москва

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки «Геология» (*программы магистратуры*).

Год (годы) приема на обучение: 2022

© Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения факультета.

Цель и задачи дисциплины

Цель: получение студентами знания о компьютерном моделировании, принципах, методах и особенностях этого вида моделирования в геодинамике.

Задачи: познакомить студентов с рассмотрением геологических процессов с точки зрения действующих сил и энергий, с методами построения компьютерных моделей в геодинамике; дать практические навыки компьютерного геодинамического моделирования.

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Геодинамика рассматривает геологические процессы с точки зрения действующих сил и энергий. Сопоставляются модели локальной изостазии, модель региональной изостазии для упругой и упруго-вязкой литосферы, области их применимости, связь с гравитационными аномалиями, стационарная задача теплопроводности и тепловой режим континентальной литосферы, нестационарная задача теплопроводности и тепловой режим океанической литосферы, тепловой режим зоны субдукции.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП – относится к вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия: базируется на знаниях по дисциплинам «Высшая математика», «Физика», «Геологические процессы».

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников (коды)	Индикаторы (показатели) достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), сопряженные с компетенциями
ПК-2.ММ Способен создавать и исследовать модели изучаемых объектов на основе использования теоретических и практических знаний в области геологии (формируется частично)	ММ.ПК-2. И-1. Знает теоретические основы и методологию моделирования. ММ.ПК-2. И-2. Знает возможности и ограничения распространенных стандартных программ моделирования (по направленности подготовки). ММ.ПК-2. И-3. Владеет базовыми навыками использования стандартных программ моделирования (по направленности подготовки). ММ.ПК-2. И-4. Знает основные особенности интерпретации данных моделирования (по направленности подготовки).	Знать: основы методов тепло- и массопереноса в геологии, знать основные этапы моделирования; принципы построения моделей. Уметь: под руководством преподавателя применить теоретическую модель и численный метод для решения геологических задач, провести компьютерное моделирование для решения базовых геологических задач. Владеть: навыками использования основных методов моделирования для решения геологических задач.

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 4 з.е., в том числе 70 академических часов на контактную работу обучающихся с преподавателем (14 часов лекции, 14 часов практические занятия и 42 часа семинары), 74 академических часа на самостоятельную работу обучающихся. Форма промежуточной аттестации –зачет.

5. Формат обучения не предполагает электронного обучения и использования дистанционных образовательных технологий (за исключением форс-мажорных обстоятельств – пандемии и т.п.)

6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических или астрономических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, часы</i>				Самостоятельная работа обучающегося <i>Виды самостоятельной работы, часы</i>				
		Занятия лекционного типа	Занятия практического типа	Занятия семинарского типа	Всего	Расчетно-графические работы	Работа с литературой (включая подготовку доклада)	Подготовка реферата	Подготовка к контрольному опросу	Всего
Раздел 1. Аппроксимация зависимостей методом наименьших квадратов	5	1	1	3	5					
Раздел 2. Интерполяция зависимостей.	13	1	1	3	5	6			2	8
Раздел 3. Спектральный анализ	13	1	1	3	5	6			2	8
Раздел 4. Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений.	13	1	1	3	5	6			2	8
Раздел 5. Решение дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей.	18	2	2	6	10	6			2	8
Раздел 6. Изостатические схемы.	18	2	2	6	10	6			2	8
Раздел 7. Тепловой режим континентальной литосферы.	18	2	2	6	10	6			2	8
Раздел 8. Тепловой режим океанической литосферы.	18	2	2	6	10	6			2	8

Раздел 9. Тепловой режим зоны субдукции	18	2	2	6	10	6			2	8
Промежуточная аттестация <u>экзамен</u>	10	<i>Устный экзамен</i>				10				
Итого	144	70				74				

Содержание лекций, семинаров

Содержание лекций

Раздел 1. Аппроксимация зависимостей методом наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов (МНК). Постановка задачи, общие принципы, критерий наилучшего соответствия аппроксимирующей зависимости экспериментальным данным. Линейная регрессия по методу наименьших квадратов. Получение параметров регрессионной зависимости и их доверительных интервалов. Коэффициент корреляции, его значение и применение. Оценка статистической значимости аппроксимации по критериям Фишера и Стьюдента. Практическое применение линейной регрессии при решении геологических задач.

Раздел 2. Интерполяция зависимостей. Постановка задачи интерполяции. Условия Лагранжа. Выбор класса функций, применяемых при интерполировании. Интерполяция каноническим полиномом. Решение системы линейных уравнений для получения коэффициентов полинома. Понятие о сплайне. Кубический сплайн, его физическая интерпретация. Условия, которым должен отвечать сплайн на каждом отрезке интерполирования (непрерывность самой функции, ее первой и второй производных). Практическая интерполяция кубическим сплайном.

Раздел 3. Спектральный анализ. Понятие о спектральном анализе (анализе Фурье) – представление анализируемой функции в виде разложения по гармоническим функциям. Анализ Фурье периодических функций с периодом 2π и с произвольным периодом. Анализ Фурье непериодических функций. Численные методы анализа Фурье, вычисление коэффициентов разложения. Практическое применение анализа Фурье при решении геологических задач. Проверка корректности с помощью Фурье-синтеза.

Раздел 4. Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Методы решения дифференциальных уравнений. Обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ). Задача Коши для ОДУ 1-го порядка. Численное решение задачи Коши. Метод Эйлера. Методы Рунге-Кутты 2-го порядка. Метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Оценка погрешности численного метода. ОДУ высших порядков и системы ОДУ 1-го порядка. Задача Коши для ОДУ n-го порядка. Краевая задача для ОДУ.

Раздел 5. Решение дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей. Понятие о методе конечных разностей (МКР). Дискретизация функций. Представление производных в конечных разностях. Конечно-разностная аппроксимация ОДУ. Представление частных производных в конечных разностях. Конечно - разностная аппроксимация ДУ в частных производных. Согласованность, устойчивость, сходимость разностной схемы. Численное решение одномерного уравнения теплопроводности МКР. Постановка задачи и граничные условия. Явный метод. Неявный метод.

Раздел 6. Изостатические схемы. Физические основы изостазии. Модели локальной изостазии. Схемы Эри и Пратта. Области применимости. Модель региональной изостазии с учетом упругой литосферы. Устойчивость литосферы к продольной нагрузке. Степень изостатической компенсации, ее связь с упругими характеристиками литосферы и размерами горизонтальной нагрузки. Определение упругих характеристик литосферы на основании анализа гравитационных аномалий и рельефа. Моделирование региональной изостазии на основании численного решения уравнения в конечных разностях. Моделирование изостазии в случае упруго-вязкой литосферы.

Раздел 7. Тепловой режим континентальной литосферы. Стационарная задача теплопроводности. Обоснование применимости стационарной задачи к расчету континентальных готерм. Постановка, уравнение, граничные условия, параметры. Учет данных по радиогенной теплогенерации в континентальной коре, разные модели зависимости концентрации радиогенных источников от глубины. Расчет континентальных

геотерм с учетом радиогенного тепловыделения в коре (аналитические и численные решения). Анализ базы данных по глобальному тепловому потоку.

Раздел 8. Тепловой режим океанической литосферы. Одномерная нестационарная задача теплопроводности для описания теплового режима океанической литосферы. Методы решения (аналитический, численный). Модель остывания полупространства для описания теплового режима океанической литосферы. Сопоставление с природными данными по тепловому потоку, мощности литосферы, глубины океанического бассейна. Ограничения модели остывания полупространства. Модель остывания плиты. Расчет океанических геотерм, теплового потока, мощности литосферы, глубины океанического бассейна для этих моделей. Сопоставление результатов с данными изучения океанского дна.

Раздел 9. Тепловой режим зоны субдукции. Двумерная нестационарная задача теплопроводности. Постановка, уравнение, граничные условия, параметры. Моделирование теплового режима остывания тела. Моделирование теплового режима зоны субдукции. Задача о тепловой релаксации литосферного слеба в мантии. Зависимость теплового режима зоны субдукции от скорости погружения. Учет трения в зоне контакта слеба с мантийным клином. Особенность хода изотерм в погружающемся слебе, сопоставление с геофизическими данными.

План проведения семинарских и практических занятий:

1. Обсуждение методов моделирования
2. Обсуждение и практическое применение методов решения систем линейных алгебраических уравнений.
3. Обсуждение и практическое применение аппроксимации зависимостей методом наименьших квадратов.
4. Обсуждение и практическое применение методов интерполяции зависимостей.
5. Обсуждение и практическое применение методов спектрального анализа
6. Обсуждение и практическое применение методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений
7. Обсуждение и практическое применение методов решения дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей.
8. Модель региональной изостазии с учетом упругой литосферы.
9. Определение упругих характеристик литосферы на основании анализа гравитационных аномалий и рельефа.
10. Континентальные геотермы с учетом радиогенного тепловыделения в коре.
11. Океанические геотермы, мощности океанической литосферы.
12. База данных по глобальному тепловому потоку.
13. Моделирование двумерного теплового режима остывания тел.
14. Моделирование теплового режима зоны субдукции.

7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Текущий контроль усвоения дисциплины осуществляется при сдаче каждым студентом выполненных расчетных работ.

Примерные темы расчетно-графических работ

1. Численная модель региональной изостазии для упругой литосферы.
2. Численная модель региональной изостазии для упруго-вязкой литосферы.
3. Построение континентальных геотерм.
4. Анализ базы данных по глобальному тепловому потоку.

5. Построение модели теплового режима океанской литосферы для модели остывания полупространства.
6. Построение модели теплового режима океанской литосферы для модели остывания плиты.
7. Построение двумерной нестационарной модели остывания геологических тел.
8. Построение модели теплового режима зоны субдукции.

7.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации (зачет е):

1. Модели локальной изостазии.
2. Модель региональной изостазии с учетом упругой литосферы.
3. Устойчивость литосферы к продольной нагрузке.
4. Степень изостатической компенсации, ее связь с упругими характеристиками литосферы и размерами горизонтальной нагрузки.
5. Определение упругих характеристик континентальной литосферы на основании анализа гравитационных аномалий и рельефа.
6. Определение упругих характеристик океанической литосферы на основании анализа гравитационных аномалий и рельефа.
7. Численное решение уравнения региональной изостазии методом конечных разностей.
8. Примеры применения модели упругого изгиба в геологии и геофизике.
9. Тепловой режим континентальной литосферы, учет данных по радиогенной теплогенерации в коре.
10. Континентальные геотермы в разных обстановках.
11. Моделирование теплового режима океанической литосферы.
12. Модель остывания полупространства.
13. Модель остывания плиты.
14. Океанические геотермы.
15. Мощность океанической литосферы, зависимость от возраста.
16. Зависимость теплового потока от возраста океанической литосферы.
17. Глубина океанического дна, зависимость от возраста литосферы.
18. Численное решение уравнения теплопроводности методом конечных разностей.
19. Двумерная нестационарная задача теплопроводности.
20. Моделирование теплового режима остывания интрузивного тела.
21. Моделирование теплового режима зоны субдукции.
22. Особенность хода изотерм в зоне субдукции, зависимость от скорости погружения. Учет трения в зоне контакта слэба с мантийным клином.

Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине (экзамен).

Результаты обучения, соответствующие виды оценочных средств	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания (устный опрос,) основ методов тепло- и массопереноса в геологии, знать основные этапы моделирования; принципы построения моделей	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания
Умения (устный опрос)	Умения	В целом	В целом	Успешное

: под руководством преподавателя применить теоретическую модель и численный метод для решения геологических задач, провести компьютерное моделирование для решения базовых геологических задач	отсутствуют	успешное, но не систематическое умение, допускает неточности принципиального характера	успешное, но содержащее отдельные пробелы.	умение.
Навыки (владения, опыт деятельности) (<i>устный опрос</i>) навыками использования основных методов моделирования для решения геологических задач	Навыки владения отсутствуют	Фрагментарное владение методикой, наличие отдельных навыков	В целом сформированные навыки.	Свободное владение и использование.

8. Ресурсное обеспечение:

А) Перечень основной и дополнительной литературы.

- основная литература:

1. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. В 2-х т. М.: "Мир", 1985. 730 с. (печатная в Библиотеке МГУ, электронная в кафедральном фонде).
2. Харбух Д., Бонэм-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии. М.: "Мир", 1974. 319 с. (печатная в Библиотеке МГУ, электронная в кафедральном фонде).

- дополнительная литература:

1. Андерсон Д., Таннехилл Д., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т. М.: Мир, 1990.
2. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. В 2-х т. М.: Мир, 1969.
3. Реология. Теория и приложения. Под ред Ф.Эйриха. М.: Изд. иностр. лит., 1962. 824 с.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1999. 798 с.
5. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
6. Gerya T. V. Introduction to numerical geodynamic modelling. New York: Cambridge University Press. 2010, 345 p.
7. Ismail-Zadeh A., Tackley P.J. Computational Methods for Geodynamics. New York: Cambridge University Press. 2010. 313 p.
8. Turcotte D.L., Schubert G. Geodynamics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2002. 863 p.

Б) Перечень программного обеспечения:

- лицензионное

нет

- нелицензионное и свободного доступа

пакет программ Open Office

В) Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

- реферативная база данных издательства Elsevier: www.sciencedirect.com

- U.S. Geological Survey. www.usgs.gov.
- Computational Infrastructure for Geodynamics (CIG). <https://geodynamics.org/>.
- Справочная система языка программирования Python 3. <https://www.python.org/doc/>.

Г) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

- поисковая система научной информации www.scopus.com
- электронная база научных публикаций www.webofscience.com
- язык программирования Python 3. <https://www.python.org/download/releases/3.0/>.
- среда разработки программ PyCharm. <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm/> .
- интерактивная оболочка Jupyter Notebook. <https://jupyter.org/> .
- пакет Anaconda. <https://www.anaconda.com>.
- редактор Notepad++. <https://notepad-plus-plus.org/downloads/>.

Д) Материально-технического обеспечение:

Учебная аудитория с мультимедийным проектором
Компьютерный класс.

9. Язык преподавания – русский.

10. Преподаватель (преподаватели): Ответственный за курс — Захаров В.С. (сотрудник кафедры динамической геологии), преподаватели: Захаров В.С., Завьялов С.П.

11. Разработчики программы: профессор Захаров В.С.