

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

УТВЕРЖДАЮ

Декан Геологического факультета

академик

\_\_\_\_\_ /Д.Ю.Пущаровский/

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 г.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Компьютерное моделирование геологических процессов**

Автор-составитель: Захаров В.С.

**Уровень высшего образования:**

*Магистратура (ММ)*

**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», уровень магистратуры ММ в редакции приказа МГУ от 30 декабря 2016 г.

Год приема на обучение – 2018

© 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 геологии.

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

**1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО** – вариативная часть, дисциплины по выбору, модуль геотектоника и геодинамика, курс – II, семестр – 3.

### **2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:**

знания в части общекультурной и общенаучной подготовки – на уровне требований Образовательного стандарта МГУ направление «Геология», уровень бакалавриата, знания в области геологии в соответствии с требованиями вступительного экзамена в магистратуру. Дисциплина необходима в качестве предшествующей для научно-исследовательской работы и выполнения выпускной квалификационной работы.

### **3. Результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.**

Компетенции выпускников, формируемые (полностью или частично) при реализации дисциплины:

ОПК-1. Способность самостоятельно формулировать цели работы, устанавливать последовательность решения профессиональных задач (формируется частично),

ОПК-4. Способность использовать современные вычислительные методы и компьютерные технологии для решения задач профессиональной деятельности (формируется частично),

СПК-1. Способность использовать специализированные знания в области динамической, исторической и региональной геологии, геотектоники и геодинамики, геологии полезных ископаемых, палеонтологии и стратиграфии, литологии и морской геологии для решения научных и практических задач (формируется частично).

### **Планируемые результаты обучения по дисциплине:**

**Знать:** основные этапы моделирования; принципы построения моделей.

**Уметь:** под руководством преподавателя использовать адекватную теоретическую модель и выбрать подходящий численный метод для решения геологической задачи, сформулировать начальные и граничные условия, написать под руководством преподавателя компьютерную программу, реализующую данный метод, провести компьютерное моделирование для решения базовых геологических задач, исследовать влияние параметров на полученные результаты.

**Владеть:** навыками использования основных методов моделирования для решения геологических задач.

**4. Формат обучения** – лекционные, практические и семинарские занятия.

**5. Объем дисциплины** составляет 4 з.е., в том числе 80 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (14 часов – занятия лекционного типа, 14 часов – занятия практического типа, 42 часа – занятия семинарского типа, 10 часов – мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 64 часа на самостоятельную работу обучающихся. Форма промежуточной аттестации – экзамен.

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

**Краткое содержание дисциплины (аннотация)**

Дается понятие о моделях и моделировании. Рассматриваются принципы и методы построения и анализа математических моделей. Рассматриваются основные численные методы: основные методы решения систем линейных алгебраических уравнений, методы аппроксимации и интерполирования функций, методы спектрального анализа, методы минимизации функций, методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. 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.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы <i>(виды самостоятельной работы – эссе, реферат, контрольная работа и пр. – указываются при необходимости)</i>
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, часы				
		Занятия лекционного типа	Занятия практического типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Раздел 1. Введение		2				
Раздел 2. Аппроксимация зависимостей методом наименьших квадратов		3	6			Контрольная работа, 8 часов
Раздел 3. Интерполяция зависимостей		3		6		Контрольная работа, 8 часов
Раздел 4. Спектральный анализ		2		6		Контрольная работа, 8 часов
Раздел 5. Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений		2		6		Контрольная работа, 8 часов
Раздел 6. Изостатические схемы.		2	2	6		Контрольная работа, 8 часов
Раздел 7. Тепловой режим континентальной литосферы.			2	6		Контрольная работа, 8 часов
Раздел 8. Тепловой режим океанической литосферы.			2	6		Контрольная работа, 8 часов
Раздел 9. Тепловой режим зоны субдукции			2	6		Контрольная работа, 8 часов
Промежуточная аттестация <i>экзамен</i>						10
<b>Итого</b>	<b>144</b>		<b>70</b>			<b>74</b>

### Содержание разделов дисциплины:

**Введение.** Принципы и методы построения и анализа математических моделей. Численные методы и математическое моделирование. Компьютерное моделирование в науках о Земле.

**Аппроксимация зависимостей методом наименьших квадратов.** Метод наименьших квадратов (МНК). Линейная регрессия по методу наименьших квадратов. Коэффициент корреляции. Оценка статистической значимости аппроксимации.

**Интерполяция зависимостей.** Постановка задачи интерполирования. Условия Лагранжа.

Интерполяция каноническим полиномом. Понятие о сплайне. Интерполяция кубическим сплайном.

**Спектральный анализ.** Понятие о спектральном анализе (анализе Фурье). Анализ Фурье периодических функций. Анализ Фурье непериодических функций. Численные методы анализа Фурье.

**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.

**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.

**Тепловой режим континентальной литосферы.** Стационарная задача теплопроводности. Постановка, уравнение, граничные условия, параметры. Расчет континентальных геотерм с учетом радиогенного тепловыделения в коре. Анализ базы данных по глобальному тепловому потоку.

**Тепловой режим океанической литосферы.** Одномерная нестационарная задача теплопроводности. Методы решения. Модель остывания полупространства и модель остывания плиты для описания теплового режима океанической литосферы. Расчет океанических геотерм, теплового потока, мощности литосферы, глубины океанического бассейна для этих моделей. Сопоставление результатов с данными изучения океанского дна.

**Тепловой режим зоны субдукции.** Двумерная нестационарная задача теплопроводности. Постановка, уравнение, граничные условия, параметры. Моделирование теплового режима остывания тела. Моделирование теплового режима зоны субдукции. Зависимость теплового режима от скорости погружения. Особенность хода изотерм в погружающемся слэбе, сопоставление с геофизическими данными.

### Содержание практических занятий

1. Решения систем линейных алгебраических уравнений методами Гаусса и прогонки.
2. Аппроксимация зависимости методом наименьших квадратов
3. Интерполяция зависимости кубическим сплайном.
4. Проведение спектрального анализа, вычислении спектра функции.
5. Поиск минимума функции 2-х переменных методом градиентного спуска.
6. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты.

### Содержание семинаров

1. Модель региональной изостазии с учетом упругой литосферы.
2. Определение упругих характеристик литосферы на основании анализа гравитационных аномалий и рельефа.
3. Континентальные геотермы с учетом радиогенного тепловыделения в коре.
4. Океанические геотермы, мощности океанической литосферы.
5. База данных по глобальному тепловому потоку.
6. Моделирование двумерного теплового режима остывания тел.
7. Моделирование теплового режима зоны субдукции.

## **Рекомендуемые образовательные технологии**

При освоении дисциплины «Компьютерное моделирование геологических процессов» предусматривается широкое использование активных и интерактивных форм проведения занятий.

**Образовательные технологии.** Лекционные, практические и семинарские занятия со студентами, с использованием оригинальных, ежегодно обновляемых авторских презентаций, проводятся в специализированной, оборудованной мультимедийной аппаратурой и персональными компьютерами, аудитории кафедры динамической геологии Геологического факультета МГУ.

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

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

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

Для текущего контроля студентов в ходе семестра проводятся контрольные опросы/работы и подготавливается реферат.

***Примерный перечень вопросов для проведения текущего контроля/ Темы контрольных 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:***

1. Понятие о моделях и моделировании.
2. Принципы и методы построения и анализа математических моделей.
3. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. Метод Гаусса.
4. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. Метод итераций.
5. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. Метод прогонки.
6. Численная аппроксимация МНК.
7. Полиномиальная интерполяция,
8. Интерполяция сплайнами.
9. Методы спектрального анализа.
10. Минимизация функции одной переменной методом золотого сечения.
11. Минимизация функции многих переменных методом координатного спуска.
12. Минимизация функции многих переменных методом градиентного спуска.
13. Способы решения дифференциальных уравнений. Задание начальных и краевых условий.
14. Понятие о конечных разностях. Дискретизация.
15. Явные и неявные методы численного решения.

16. Сходимость, устойчивость, погрешность аппроксимации.
17. Обыкновенные дифференциальные уравнения, системы обыкновенных дифференциальных уравнений.
18. Метод Эйлера численного решения дифференциальных уравнений.
19. Метод Рунге-Кутты дифференциальных уравнений.
20. Явный метод численного решения дифференциальные уравнения в частных производных.
21. Неявный метод численного решения дифференциальные уравнения в частных производных.
22. Модели локальной изостазии.
23. Модель региональной изостазии с учетом упругой литосферы.
24. Устойчивость литосферы к продольной нагрузке.
25. Степень изостатической компенсации, ее связь с упругими характеристиками литосферы и размерами горизонтальной нагрузки.
26. Определение упругих характеристик литосферы на основании анализа гравитационных аномалий и рельефа.
27. Численное решение уравнения региональной изостазии методом конечных разностей.
28. Примеры применения модели упругого изгиба в геологии и геофизике.
29. Тепловой режим континентальной литосферы, континентальные геотермы.
30. Моделирование теплового режима океанической литосферы.
31. Океанические геотермы.
32. Мощность океанической литосферы.
33. Численное решение уравнения теплопроводности методом конечных разностей.
34. Двумерная нестационарная задача теплопроводности.
35. Моделирование теплового режима остывания интрузивного тела.
36. Моделирование теплового режима зоны субдукции.

### Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Результаты обучения	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания основных этапов моделирования; принципы построения моделей. ких задач.	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания
Умения: использовать адекватную теоретическую модель и выбрать подходящий численный метод для решения геологической задачи, сформулировать начальные и граничные условия, написать компьютерную	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение, допускает неточности непринципиального характера	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы	Успешное умение использовать адекватную теоретическую модель и выбрать подходящий численный метод для решения геологической задачи



программу, реализующую данный метод, провести компьютерное моделирование для решения базовых геологических задач, исследовать влияние параметров на полученные результаты				
Владения навыками использования основных методов моделирования для решения геологических задач.	Навыки владения методами отсутствуют	Фрагментарное владение методикой, наличие отдельных навыков	В целом сформированные навыки	Владение методами моделирования для решения геологических задач

## 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.
2. Харбух Д., Бонэм-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии. М.: "Мир", 1974. 319 с.

#### - 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 лицензионного программного обеспечения: пакет программ Microsoft Office PowerPoint

В) Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

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

Г) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (лицензионное программное обеспечение не требуется):

1. Язык программирования Python 3. <https://www.python.org/download/releases/3.0/>.
2. Среда разработки программ PyCharm. <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm/>.
3. Интерактивная оболочка Jupyter Notebook. <https://jupyter.org/>.
4. Пакет Anaconda. <https://www.anaconda.com>.
5. Редактор Notepad++. <https://notepad-plus-plus.org/downloads/>.

Д) Материально-техническое обеспечение: персональные компьютеры, мультимедийный проектор, компьютер, экран.

**9. Язык преподавания** – русский.

**10. Преподаватель (преподаватели)** – Захаров В.С.

**11. Автор (авторы) программы** – Захаров В.С.