

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**

### **Геодинамика**

Автор-составитель: Захаров В.С.

**Уровень высшего образования:**

*Магистратура*

**Направление подготовки:**

**05.04.01 Геология**

**Направленность (профиль) ОПОП:**

**Геотектоника и геодинамика**

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 бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки*).

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** изучения дисциплины «Геодинамика» состоит в рассмотрении методов современной геодинамики для оценки состояния литосферы с точки зрения действующих сил и энергий, моделирования процессов формирования ее основных структур, и для использования геодинамики при интерпретации геологических и геофизических данных.

**Задачами** дисциплины «Геодинамика» являются: рассмотрение основных типов решаемых геодинамикой задач, знакомство с методами современной геодинамики, рассмотрение количественных геодинамических моделей процессов, происходящих в коре и мантии Земли, а также используемых при изучении строения и эволюции этих структур и при интерпретации геологических и геофизических данных, главные достижения и проблемы геодинамики

### Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Геодинамика рассматривает геологические процессы с точки зрения действующих сил и энергий. Рассматриваются методы современной геодинамики для оценки геодинамического состояния литосферы. Основное внимание уделяется методам моделирования процессов в литосфере и мантии Земли и примерам приложения моделей и методов геодинамики к изучению конкретных тектонических структур. Подробно рассматриваются понятия и свойства литосферы и астеносферы, реология и напряженное состояние литосферы, методы их изучения, термический режим континентальной и океанической литосферы, модели основных геодинамических обстановок, движущие силы и основные проблемы тектоники плит, конвекция в мантии Земли как движущий механизм глобальных тектонических процессов.

**1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП** – относится к вариативной части ОПОП, является обязательной для освоения.

**2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия:** базируется на знаниях по дисциплинам «Высшая математика», «Физика», «Общая геология», «Геотектоника», «Физика Земли».

**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
(СПК-3.М (1)) Способен описать геодинамическое состояние среды при интерпретации геологических и геофизических данных в различных геодинамических обстановках	М.СПК-3 (1). И-1 Использует и применяет знания в области геодинамики при описании геодинамического состояния среды в различных геодинамических обстановках	<b>Знать:</b> современные представления о динамике недр Земли и ее поверхностной оболочки; современные методы изучения процессов, происходящих в недрах и на поверхности Земли; основные технологии изучения геодинамических процессов; <b>Уметь:</b> рассчитывать степень изостазии, строить диаграммы предельной прочности литосферы, определять геотермальное состояние литосферы. <b>Владеть:</b> современными методами определения геодинамического состояния среды и использовать их при интерпретации геологических и геофизических данных.

**4. Объем дисциплины (модуля)** составляет **2** з.е., в том числе **28** академических часов на контактную работу обучающихся с преподавателем (лекции и семинары вместе), **44** 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 лабораторного типа	Занятия семинарского типа	Всего	Расчетно-графические работы	Работа с литературой (включая подготовку тезисов)	Подготовка реферата	Подготовка к контрольному опросу	Всего
Раздел 1. Введение.	2	1		1	2					
Раздел 2. Строение Земли. Основы тектоники литосферных плит.	4	1		1	2				2	2
Раздел 3. Литосфера и астеносфера	11	2		2	4				7	7
Раздел 4. Модели изостазии. Упругие свойства литосферы	11	2		2	4				7	7
Раздел 5. Геодинамические приложения теории теплопроводности	11	2		2	4				7	7
Раздел 6. Основные геодинамические обстановки	11	2		2	4				7	7
Раздел 7. Геодинамика и сейсмичность	10	2		2	4				6	6
Раздел 8. Модели конвекции в мантии Земли	10	2		2	4				6	6
Промежуточная аттестация <i>зачет</i>	2					2				
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>28</b>				<b>44</b>				

## Содержание лекций, семинаров

### Содержание лекций

**Раздел 1. Введение.** Предмет и основные понятия геодинамики. Рассматривается предмет геодинамики, методы описания тектонических процессов, происходящих в поверхностных оболочках Земли. Формулируются основные принципы геодинамики. Даются современные представления о динамике недр Земли и ее поверхностной оболочки, современные методы изучения процессов, происходящих в недрах и на поверхности Земли. Современные технологии изучения геодинамических процессов: измерение глобального гравитационного поля и его временных вариаций, измерению вертикальных и горизонтальных смещений, изучению сейсмичности, напряженного состояния литосферы и его вариаций во времени, изучение геотермального, магнитного поля Земли, электропроводности оболочек Земли, использование данных о вулканизме и горячих точках, сейсмотомографических моделей и результатов численного моделирования.

**Раздел 2. Строение Земли. Основы тектоники литосферных плит.** Проводится обзор основных границ и оболочек Земли, с рассмотрением их природы и свойств с точки зрения глобальных геодинамических процессов. Рассматриваются базовые основы тектоники плит: разделение верхней оболочки Земли на жесткую литосферу и ослабленную астеносферу, существенно различающихся по механическим (реологическим) свойствам, разделение литосферы на плиты разных размеров, относительное движение плит и их взаимодействие по границам разного типа, описание взаимного перемещения жестких плит методами сферической геометрии, согласованность объемов литосферы, порождающийся в зонах спрединга и поглощающихся в зонах субдукции, мантийная конвекция как основная причина глобальных тектонических процессов, с точки зрения энергии и действующих сил. Основные трудности, противоречия и проблемы тектоники плит, направления развития.

**Раздел 3. Литосфера и астеносфера.** Понятие о литосфере и астеносфере. Положение границы литосферы и астеносферы в зависимости от методов исследования. Представление о литосфере как о пограничном слое (разного типа). Понятие о термальной литосфере. Сейсмическая литосфера и астеносфера. Сейсмическая литосфера как высокоскоростной слой с высокой добротностью. Мощность сейсмической литосферы по разным данным. Литосфера и астеносфера по электропроводности. Мощность литосферы континентов и океанов по электропроводности, его вариации и сопоставление с результатами других методов. Напряжения и деформации в литосфере. Методы изучения напряженного состояния. Мировая карта напряжений. Реология литосферы и астеносферы. Соотношение между напряжением и деформацией, их зависимость от условий нагружения. Механизмы упругости и вязкости твердого тела. Диффузионная, дислокационная ползучесть. Зависимость вязкости твердого тела от параметров. Экспериментальные реологические параметры. Вязкость верхней мантии. Оценка вязкости астеносферы (верхней мантии) по постледниковому поднятию. Кривые прочности литосферы. Основные принципы построения кривых прочности литосферы. Зависимость прочности, реологического состояния и расслоения литосферы от строения и состава литосферы, теплового режима, условий нагружения, их вариации в разных тектонических обстановках. Определения мощности механической литосферы по различным критериям.

**Раздел 4. Модели изостазии. Упругие свойства литосферы.** Рельеф и гравитационные аномалии в свободном воздухе. Понятие об изостазии. Модели локальной изостазии, основные соотношения. Гравитационные аномалии Буге, изостатические и изостатическая компенсация. Модели региональной изостазии с учетом упругих свойств литосферы. Прогибание упругой литосферы под весом орогена. Изгибная жесткость и эффективная упругая толщина литосферы. Решение для случая пространственно-периодической нагрузки, собственная длина волны изгиба литосферы, степень компенсации, зависимость

от упругих свойств и пространственных размеров. Устойчивость литосферы к продольной нагрузке.

Модели упругого изгиба океанической литосферы. Прогибание океанской литосферы под весом цепи островов. Изгиб океанской литосферы в зоне субдукции. Оценка упругих свойств океанической литосферы. Зависимость упругих свойств океанической литосферы от возраста. Соотношение рельефа, гравитационных аномалий и упругих свойств континентальной и океанической литосферы. Упругие и вязко-упругие свойства литосферы, изгиб упруго-вязкой литосферы.

**Раздел 5. Геодинамические приложения теории теплопроводности.** Механизмы теплопередачи. Тепловой поток. Результаты измерения геотермального градиента на поверхности Земли. Зависимость теплового потока от возраста континентальной и океанической литосферы. Уравнение теплопроводности как основа расчета теплового режима литосферы. Тепловой режим континентальной литосферы, учет радиогенных источников в континентальной коре, Изменение теплогенерации с глубиной. Континентальные геотермы. Мощность термальной литосферы континентов. Тепловой режим океанской литосферы. Модель остывания полупространства и модель остывания плиты. Океанская геотерма, мощность океанской литосферы, тепловой поток, глубина океанского бассейна в зависимости от возраста литосферы. Обобщение: геотермы для континентов и океанов, термальная литосфера, соотношение с адиабатой и кривой солидуса.

**Раздел 6. Основные геодинамические обстановки.** Зоны спрединга. Термическая модель океанической рифтовой зоны. Быстрый и медленный спрединг, магматические очаги, степень плавления. Различия процессов, строения рифтовых долин и рельефа океанического дна в зависимости от скорости спрединга. Сегментация срединно-океанических хребтов Тектонофизические и численные модели зон спрединга. Зоны субдукции. Главные типы зон субдукции. Основные элементы зон субдукции и их взаимодействие. Выгнутость зон субдукции. Особенности расположения очагов землетрясений по глубине, зоны Беньюфа. Проявление зон субдукции в гравитационных и магнитных аномалиях. Геофизическое выражение зон субдукции. Сейсмотомографическое изображение зон субдукции. Тепловой поток в зонах субдукции. Тепловая модель зон субдукции. Угол субдукции и скорость погружения плиты, напряжения в задуговом бассейне. Роль фазовых переходов. Континентальная коллизия. Условия формирования, примеры. Геодинамическая схема. Основные процессы в зонах коллизии. Коллизия Индостан – Евразия. Проявления в современных движениях. Геодинамические модели коллизии (тектонофизические и численные). Сейсмотомография зон коллизии.

**Раздел 7. Геодинамика и сейсмичность.** «Очаговая» сейсмология. Теория упругой отдачи. Очаг землетрясения. Механизм очага. Главные оси и главные напряжения. Нодальные плоскости. Описание ориентировки нодальных плоскостей. Типы разрывов и механизм очага землетрясения. Связь типа механизма очага с тектонической обстановкой. Особенности распределения напряжений в литосфере на конвергентных, дивергентных и трансформных границах плит. Скорость конвергенции, возраст литосферы и характеристики землетрясений. Особенности распределения сейсмичности и сейсмическая фрагментация зон субдукции. Ядерные взрывы и землетрясения различие в механизмах очага. Характеристики величины землетрясений (магнитуда и интенсивность). Типы магнитуд. Связь между магнитудой и полной энергией землетрясения. Закон Гутенберга-Рихтера.

**Раздел 8. Модели конвекции в мантии Земли.** Понятие о конвекции. Конвекция Релея-Бенара. Уравнения тепловой конвекции. Число Релея и характер тепловой конвекции. Число Релея и характер конвекции. Результаты моделирования тепловой конвекции. Влияния вариаций числа Релея на стиль тепловой конвекции. Модели сферической конвекции в мантии. Различные режимы конвекции. Модели мантийной конвекции с

континентами. Проблема общемантийной и двухслойной конвекции. Влияние фазовых переходов в мантии на стиль и особенности конвекции. Барьерный эффект границы «660 км». Фазовые переходы в погружающейся плите и их влияние плавучесть. Сейсмоотографические изображения восходящих и нисходящих потоков в мантии. Роль слоя D''. Модель термохимической конвекции. Плюмы и конвекция в мантии. Движущие силы тектоники плит.

*План проведения семинаров.*

1. Обсуждение предмета и основные понятия геодинамики.
2. Обсуждение основ тектоники литосферных плит.
3. Обсуждение понятий и характеристик литосферы и астеносферы.
4. Обсуждение моделей изостазии и упругих свойств литосферы.
5. Обсуждение геодинамических приложений теории теплопроводности.
6. Обсуждение геодинамики и сейсмичности.
7. Обсуждение моделей конвекции в мантии Земли.

## **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 контрольном тестировании.

*Примерный перечень вопросов (тестов) для проведения текущего контроля:*

1. Определение вязкости астеносферы по динамике постледникового поднятия.
2. Определение глубины перехода от упруго-хрупкого к нелинейно-вязкого реологического поведения в коре.
3. Соотношения для рельефа, корней при разной нагрузки и эрозии для моделей локальной изостазии.
4. Соотношение между упругими характеристиками океанической литосферы и продольным напряжением при сжатии литосферы в складки.
5. Соотношение между упругими характеристиками океанической литосферы и характеристиками изгиба под весом островов.
6. Соотношения между упругими характеристиками океанической литосферы и характеристиками изгиба перед зоной субдукции.
7. Соотношения между упругими характеристиками континентальной литосферы, аномалиями Буге и рельефом в орогенных зонах.
8. Построение континентальных геотерм.
9. Оценка термальной мощности континентальной литосферы. Оценка температуры и теплового потока на разных глубинах.
10. Построение океанических геотерм.
11. Оценка термальной мощности континентальной литосферы.
12. Сопоставление теплового потока (измеренного и модельного) в разных регионах.

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

*Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации (зачет е):*

1. По результатам изменения постледникового поднятия во времени оценить величину вязкости верхней мантии (астеносферы).
2. Определить глубину перехода от упруго-хрупкого (BD) к нелинейно-вязкому стилю разрушения в коре при заданных вещественных параметрах и скорости деформации.



3. Горы высотой 4 км находятся в изостатическом равновесии. Какова будет высота гор после достижения нового состояния равновесия, если с поверхности эродирует 2 км? 4 км? 10 км? Сколько материала должно быть эродировано, чтобы полностью эродировать горы до уровня моря?
4. Оцените мощность ледника и его поверхностный рельеф в определенном районе в конце оледенения в предположении изостатической компенсации района перед началом таяния ледника и в настоящее время.
5. Для заданных регионов определить характер изостатической компенсации, обосновать.
6. По соотношению мощности коры и аномалий Буге определить скачек плотности на границе коры и мантии, считая район изостатически скомпенсированным.
7. Для океанической литосферы задана эффективная упругая мощность. Определить изгибную жесткость, уровень напряжений, необходимых для изгибания ее в складки  $\sigma_{кр}$  и характерную длину волны изгиба.
8. Для океанической литосферы задана характерная длина волны изгиба. Определить уровень напряжений, необходимых для изгибания ее в складки  $\sigma_{кр}$ , изгибную жесткость и эффективную упругую мощность литосферы.
9. Для океанической литосферы, прогнутой под весом островов, задано положение максимума периферийного поднятия км относительно оси островов. Определить характерную длину волны изгиба, изгибную жесткость и эффективную упругую мощность литосферы.
10. Для океанической литосферы, прогнутой изогнутой перед зоной субдукции, задано положение максимума периферийного поднятия относительно оси желоба. Определить характерную длину волны изгиба, изгибную жесткость и эффективную упругую мощность литосферы.
11. Для континентальной литосферы, прогнутой под весом орогена, определить изгибную жесткость и эффективную упругую мощность по соотношению рельефа и аномалий Буге.
12. Показать, почему для континентальной литосферы геотерму можно считать стационарной.
13. Рассчитать континентальные геотермы и зависимость теплового потока от глубины, а также температуру и тепловой поток на подошве коры для разных вариантов зависимости удельной теплогенерации от глубины.
14. Определить термальную мощность континентальной литосферы для модели с экспоненциальным законом распределения теплогенерации с глубиной.
15. Оценить и обосновать оценку температуры средней коры (на подошве коры) для заданного района, если известна зависимость теплового потока от теплогенерации на поверхности. Принять, что радиогенные источники тепла в кору убывают по экспоненциальному закону с глубиной.
16. Для океанической литосферы заданного возраста определить мощность термальной литосферы. Оценить 2 способами, сравнить.
17. Рассчитать тепловой поток для океанической литосферы заданного возраста.
18. Проанализируйте тепловой поток в заданном районе океана, оцените, насколько модельный тепловой поток соответствует измеренному.
19. Оценить и обосновать оценку возможного диапазона числа Релея для: верхней мантии, нижней мантии, внешнего ядра.
20. Оцените и обоснуйте, насколько амплитуда объемной волны ядерного взрыва может быть больше амплитуды объемной волны землетрясения, если магнитуды одинаковы и волны зарегистрированы на одном и том же расстоянии? Сопоставьте энергию этих событий.

## Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине (зачет).

Оценка результатов обучения, соответствующие виды оценочных средств	Незачет	Зачет
<b>Знания</b> современных представлений о динамике недр Земли и ее поверхностной оболочки; современных методов изучения процессов, происходящих в недрах и на поверхности Земли; основных технологий изучения геодинамических процессов. <i>(устный опрос)</i>	Фрагментарные знания или отсутствие знаний	Сформированные систематические знания или общие, но не структурированные знания
<b>Умения</b> рассчитывать степень изостазии, строить диаграммы предельной прочности литосферы, определять геотермальное состояние литосферы <i>(письменное тестирование)</i>	В целом успешное, но не систематическое умение или отсутствие умений	Успешное и систематическое умение или в целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности непринципиального характера)
<b>Владения</b> современными методами определения геодинамического состояния среды и использовать их при интерпретации геологических и геофизических данных. <i>(письменное тестирование)</i>	Наличие отдельных навыков или отсутствие навыков	Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач или, в целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме

### 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. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с. (печатная в Библиотеке МГУ, электронная в кафедральном фонде).

##### Дополнительная:

1. Turcotte D.L., Schubert G. Geodynamics. 3rd eds. Cambridge: Cambridge University Press. 2014. 626 p. (электронная в кафедральном фонде).
2. Anderson D.L. New Theory of the Earth. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 384 p. (электронная в кафедральном фонде).
3. Artemieva I. M. Lithosphere: an interdisciplinary approach. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 773 p. (электронная в кафедральном фонде).
4. Fowler C.M.R. The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 685 p. (электронная в кафедральном фонде).

5. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. Cambridge: Cambridge University Press. 2004. 940 p. (электронная в кафедральном фонде).
6. Лобковский Л. И., Никишин А. М., Хаин В. Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М: Научный мир, 2004. 612 с. (электронная в кафедральном фонде).
7. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. В 2-х т. М., Мир, 1969. (электронная в кафедральном фонде).
8. Реология. Теория и приложения. Под ред Ф.Эйриха. М.: Изд. иностр. лит., 1962. 824 с. (электронная в кафедральном фонде).
9. Karato S. Deformation of Earth Materials. An Introduction to the Rheology of Solid Earth. Cambridge: Cambridge University Press. 2008. 463 p. (электронная в кафедральном фонде).
10. Gerya T. V. Introduction to numerical geodynamic modelling. New York: Cambridge University Press. 2019. 472 p. (электронная в кафедральном фонде).

**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](http://www.sciencedirect.com)

- U.S. Geological Survey. [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov).

- Computational Infrastructure for Geodynamics (CIG). <https://geodynamics.org/>.

**Г) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

- поисковая система научной информации [www.scopus.com](http://www.scopus.com)

- электронная база научных публикаций [www.webofscience.com](http://www.webofscience.com)

**Д) Материально-технического обеспечение:**

Учебная аудитория с мультимедийным проектором

Компьютерный класс.

**9. Язык преподавания** – русский.

**10. Преподаватель (преподаватели):** Ответственный за курс — Захаров В.С. (кафедра динамической геологии).

**11. Разработчики программы:** профессор Захаров В.С.