

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

УТВЕРЖДАЮ

И.О. декана Геологического факультета

чл.-корр. РАН \_\_\_\_\_/Н.Н.Еремин/

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Теория геофизических полей**

**Geophysical field theory**

Авторы-составители: Булычев А.А., Пушкарев П.Ю.

**Уровень высшего образования:**

*Бакалавриат*

**Направление подготовки:**

**05.03.01 Геология**

**Направленность (профиль) ОПОП:**

**Геофизика**

Форма обучения:

*Очная*

Рабочая программа рассмотрена и одобрена  
Учебно-методическим Советом Геологического факультета  
(протокол № \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_)

Москва 2022

Рабочая программа дисциплины 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*).

ОС МГУ утвержден решением Ученого совета МГУ имени М.В. Ломоносова от \_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ 2022 года (протокол №\_\_).

Год приема на обучение: 2022

## Цель и задачи дисциплины

**Целью** курса "Теория геофизических полей" является получение знаний о фундаментальных свойствах физических полей, применяемых в геофизике, а также об особенностях их пространственной и временной структуры.

**Задачи** - изучение математической теории геофизических полей, овладение методами решения задач о поле основных видов возбудителей в простых моделях среды.

### Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Рассматривается математический аппарат теории геофизических полей: алгебра физических величин, дифференцирование и интегрирование физических полей, криволинейные координатные системы. Исследуются возбудители, уравнения и потенциалы поля, вопросы графического изображения полей, модели безвихревого и вихревого полей. Анализируются электромагнитное поле в вакууме и веществе, уравнения электромагнитного поля и его потенциалов, модели электромагнитного поля.

**1. Место дисциплины в структуре ОПОП** – относится к профильному блоку вариативной части ОПОП, является обязательной для освоения. Курс – III, семестр – 5.

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

базируется на знаниях по дисциплинам «Высшая математика», «Математический анализ», «Аналитическая геометрия», «Линейная алгебра», «Дифференциальные уравнения», «Теория функций комплексного переменного», «Физика», «Физика вещества».

### 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников	Индикаторы (показатели) достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине, сопряженные с компетенциями
<b>ОПК-1.Б.</b> Способен применять знания фундаментальных разделов наук о Земле, базовые знания естественно-научного и математического циклов при решении стандартных профессиональных задач (формируется частично)	<b>Б.ОПК-1.И-1.</b> Использует базовые знания фундаментальных разделов наук естественнонаучного и математического циклов в профессиональной деятельности	<b>Знать:</b> основные закономерности физических полей (гравитационного, магнитного, электрического, электромагнитного, сейсмического, теплового), существующих в сплошной среде, свойства которой характеризуются усредненными параметрами; <b>Уметь:</b> математически описать физическое поле, создаваемое различными возбудителями, выполнять математическое моделирование физических полей; <b>Владеть:</b> навыками математического анализа и методами вычисления геофизических полей.
<b>СПК-1.Б.</b> Способен решать задачи в области разведочной геофизики при моделировании геофизических полей для сложно-построенных физико-геологических моделей	<b>Б.СПК-1.И-2.</b> Владеет методами решения прямых задач геофизики для сред различной размерности	<b>Знать:</b> постановку прямых задач основных геофизических методов; <b>Уметь:</b> определять и графически изображать структуру полей простых скалярных и векторных возбудителей; <b>Владеть:</b> методами вычисления физических полей для основных моделей возбудителей среды, применяемых в разведочной геофизике.

геологических сред, в том числе трехмерных (формируется частично).		
--	--	--

**4. Объем дисциплины** составляет **4** з.е., в том числе **64** академических часа на контактную работу обучающихся с преподавателем (лекции и семинары вместе), **80** академических часов на самостоятельную работу обучающихся. Форма промежуточной аттестации – экзамен.

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

**6. Содержание дисциплины**, 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,  Форма промежуточной аттестации по дисциплине	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 семинарского типа	Всего	Подготовка к контрольной работе	Всего
Введение	<b>2</b>	2		<b>2</b>		
Раздел 1. Математический аппарат	<b>20</b>	14	6	<b>20</b>		
Текущая аттестация 1: контрольная работа	<b>15</b>				15	<b>15</b>
Раздел 2. Стационарное поле	<b>20</b>	16	4	<b>20</b>		
Текущая аттестация 2: контрольная работа	<b>15</b>				15	<b>15</b>
Раздел 3. Электромагнитное поле	<b>22</b>	16	6	<b>22</b>		
Текущая аттестация 3: контрольная работа	<b>15</b>				15	<b>15</b>
Промежуточная аттестация <i>экзамен</i>	<b>35</b>	<i>Устный экзамен</i>				<b>35</b>
<b>Итого</b>	<b>144</b>	<b>64</b>				<b>80</b>

## Содержание лекций

### ВВЕДЕНИЕ

#### I). Цели и задачи курса

Введение. Цели и задачи курса. Рекомендуемая литература.

### 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ

#### II). Алгебра физических величин

Линейная зависимость векторов. Разложение вектора по базису. Преобразование компонент вектора при смене базиса. Скалярное и векторное произведения. Смешанное и двойное векторное произведения. Понятие тензора. Линейное преобразование векторов. Основные правила матричной алгебры.

#### III). Дифференцирование физических полей

Градиент скалярного поля. Производная скалярного и векторного полей по направлению. Дивергенция и ротор векторного поля. Вторые производные, лапласиан. Оператор Гамильтона, основные формулы дифференцирования.

#### IV). Интегрирование физических полей

Поток скалярного поля. Скалярный и векторный потоки векторного поля. Напряжение и циркуляция векторного поля. Векторные формулировки теорем Остроградского–Гаусса и Стокса. Градиент, дивергенция и ротор как объемные производные. Формулы Грина.

#### V). Криволинейные координатные системы

Понятие ортогональной криволинейной системы координат. Коэффициенты Ламэ. Переход от центрального базиса к локальному. Преобразование компонент вектора при смене базиса. Элементы длины, площади и объема в криволинейной системе координат. Градиент скалярного поля, дивергенция и ротор векторного поля, лапласиан скалярного и векторного поля в криволинейной системе координат. Сферические и цилиндрические координаты.

### 2. СТАЦИОНАРНОЕ ПОЛЕ

#### VI). Возбудители поля

Условия существования поля. Определение векторного поля по его дивергенции и ротору. Источники и вихри поля. Гидродинамическая интерпретация. Безвихревые и вихревые поля.

#### VII). Уравнения поля

Функция включения (функция Хевисайда), функция Дирака (единичный импульс), функция Грина для решения скалярного уравнения Пуассона. Решение скалярного и векторного уравнений Пуассона.

#### VIII). Потенциалы векторного поля

Скалярный и векторный потенциалы. Калибровочное условие Кулона. Потенциальное и соленоидальное поля. Лапласово поле. Принцип суперпозиции полей. Классификация полей.

#### IX). Графическое изображение полей

Графическое изображение поля. Уровенные поверхности, уровенные слои, векторные линии и трубки.

#### X). Модели безвихревого поля

Статическое поле. Точечный и дипольный источники. Линейные источники, логарифмический потенциал. Простой и двойной слои. Объемные источники и их поляризация. Линейный вихрь. Поверхностный и объемный вихри. Теоремы эквивалентности (замена вихрей источниками), формула Пуассона. Основные модели (поле кольца, диска, плоского слоя, сферического слоя, сферы). Непрерывность поля и потенциала и ее нарушения. Уравнение Пуассона. Прямые и обратные задачи. Задачи

Дирихле и Неймана. Функция Грина. Физические иллюстрации. Гравитационное, электрическое и магнитостатические поля. Энергия.

#### **XI). Модели вихревого поля**

Линейный вихрь. Элемент линейного вихря. Эквивалентность линейного вихря однородному двойному слою. Различные выражения поля диполя. Круговой линейный вихрь. Бесконечный прямолинейный вихрь. Поверхностный вихрь. Плоский вихрь. Эквивалентность поверхностного вихря неоднородному двойному слою. Граничные условия на поверхностном вихре. Объемный вихрь.

### **3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

#### **XII). Электромагнитное поле в вакууме**

Электрическое поле в опытах Кулона. Возбудители постоянного электрического поля. Движение электрических зарядов. Закон сохранения количества электричества. Магнитное поле в опытах Кулона. Закон Био-Савара-Лапласа. Закон Ампера о взаимодействии токов. Возбудители постоянного магнитного поля. Закон Фарадея. Ток смещения. Система уравнений Максвелла в вакууме.

#### **XIII). Электромагнитное поле в веществе**

Макроскопическая модель вещества. Свободные и связанные заряды. Ток проводимости. Поляризационный ток. Ток намагничивания. Источники и вихри поля  $D$ . Источники и вихри поля  $H$ . Сторонние возбудители поля. Уравнения поля в веществе. Релаксация свободных зарядов в однородной среде. Заряды в неоднородной среде. Кусочно-однородные среды, граничные условия. Магнитное возбуждение поля. Модели электромагнитного поля. Гармонические колебания электромагнитного поля. Уравнения Максвелла в случае гармонического возбуждения.

#### **XIV). Уравнения электромагнитного поля и его потенциалов**

Разделение уравнений Максвелла. Электродинамические потенциалы электрического типа. Электродинамические потенциалы магнитного типа. Стационарное поле в безграничной однородной среде. Функция Грина для уравнения Гельмгольца. Решение уравнения Гельмгольца для скалярного потенциала. Следствия из решений уравнений Гельмгольца. Вычисление поля в кусочно-однородной среде.

#### **XV). Стандартные модели электромагнитного поля**

Электрический диполь в безграничной однородной среде. Решение уравнения Гельмгольца для электрического диполя. Ближняя зона электрического диполя. Дальняя зона электрического диполя. Импеданс. Магнитный диполь в безграничной однородной среде. Вертикальный магнитный диполь над однородным полупространством. Плоская волна в однородной среде. Падение плоской волны на плоскую границу двух сред. Задача Тихонова-Каньяра.

*План проведения семинаров.*

1. Решение задач по алгебре физических величин
2. Решение задач по дифференцированию физических полей
3. Решение задач по интегрированию полей и криволинейным системам координат
4. Примеры расчётов потенциальных полей различных источников
5. Примеры расчётов вихревых полей различных возбудителей
6. Анализ первичного поля гармонического электрического диполя
7. Анализ нормального поля гармонического магнитного диполя
8. Анализ гармонического плосковолнового поля в слоистой среде

## 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 выполнении каждым студентом контрольной работы по завершении каждого из трёх разделов курса.

Примеры вопросов на контрольных работах:

- Найти смешанное произведение векторов (координаты векторов даны);
- Найти источники и вихри поля (поле дано в виде функции);
- Нарисовать потенциал и поле дипольного источника;
- Нарисовать поле кругового/прямолинейного вихря;
- Записать закон Кулона/Ампера/Фарадея/Ома в интегральной/дифференциальной форме;
- Записать уравнения Максвелла для стационарной/квазистационарной/волновой модели.

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

*Примеры вопросов при промежуточной аттестации (экзамене):*

- (1) Сложение и умножение векторов.
- (2) Преобразование компонент вектора при смене базисов.
- (3) Оператор Гамильтона (оператор «набла»).
- (4) Дивергенция полей:  $\operatorname{div}(\vec{A} + \vec{B})$ ,  $\operatorname{div}(a\vec{A})$ ,  $\operatorname{div}(\vec{A} \times \vec{B})$ .
- (5) Теорема Остроградского-Гаусса и ее векторные формулировки.
- (6) Понятие криволинейных координат, коэффициенты Ламэ.
- (7) Дивергенция векторного поля в криволинейной системе координат.
- (8) Цилиндрическая система координат.
- (9) Теоремы единственности определения скалярной и векторной функции.
- (10) Функция Хэвисайда и функция Дирака.
- (11) Решение векторного уравнения Пуассона.
- (12) Классификация полей.
- (13) Безвихревое векторное поле в графическом изображении.
- (14) Поле дипольного источника.
- (15) Поле однородного кругового цилиндра.
- (16) Двойной поверхностный источник (двойной слой, дипольный слой).
- (17) Поляризованный объемный источник. Граничные условия.
- (18) Элемент линейного вихря.
- (19) Круговой линейный вихрь. Бесконечный прямолинейный вихрь.
- (20) Эквивалентность поверхностного вихря неоднородному двойному слою.
- (21) Электрическое поле в опытах Кулона.
- (22) Закон сохранения количества электричества.
- (23) Закон Ампера о взаимодействии токов.
- (24) Ток смещения.
- (25) Свободные и связанные заряды.
- (26) Ток намагничивания.
- (27) Сторонние возбудители поля.
- (28) Заряды в неоднородной среде.
- (29) Модели электромагнитного поля.
- (30) Разделение уравнений Максвелла.
- (31) Стационарное поле в безграничной однородной среде.
- (32) Следствия из решений уравнений Гельмгольца.
- (33) Решение уравнения Гельмгольца для электрического диполя.
- (34) Импеданс.
- (35) Плоская волна в однородной среде.



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

Результаты обучения, соответствующие оценочным средствам	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
<b>Знания</b> основных закономерностей физических полей (гравитационного, магнитного, электрического, электромагнитного, сейсмического, теплового), существующих в сплошной среде, свойства которой характеризуются усреднёнными параметрами (письменный или устный опрос)	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания
<b>Умения</b> математически описать физическое поле, создаваемое различными возбудителями, выполнять математическое моделирование физических полей (письменный или устный опрос)	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение, допускает принципиальные неточности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы	Успешное умение
<b>Навыки владения</b> методами математического анализа и численного расчета геофизических полей с применением современного программного обеспечения (письменный или устный опрос)	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:

- Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. М.: Недра, 1985.
- Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. М.: Недра, Ч. I, 1997, Ч. II, 2000, Ч. III., 2001.
- Кудрявцев Ю.И. Теория поля и ее применение в геофизике. Л., Недра, 1988.
- Овчинников И.К. Теория поля. М.: Недра, 1979.
- Булах Е.Г., Шуман В.Н. Основы векторного анализа и теория поля. Киев: Наукова думка, 1998.

##### - дополнительная литература:

- Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. Л.: ОНТИ, 1934.
- Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1999.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988.

- Тамм И.Е. Основы теории электричества. Л.: ГОСТЕХИЗДАТ, 1949.
- Стрэттон Дж. Теория электромагнетизма. Л.: ГОСТЕХИЗДАТ, 1948.
- Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, Т. 5, 1966, Т. 6, 1966.
- Бурсиан В.Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. Л.: Недра, 1972.
- Жданов М.С. Геофизическая электромагнитная теория и методы. М.: Научный мир, 2012.
- Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика. Под ред. В.И. Дмитриева. М.: Недра, 1990.

**9. Язык преподавания** – русский.

**10. Преподаватели**

Ответственный за курс: Булычев Андрей Александрович.

Преподаватели: Булычев А.А., Пушкарев П.Ю.

**11. Разработчики программы:** Булычев А.А., зав. кафедрой; Пушкарев П.Ю., профессор.