

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

**УТВЕРЖДАЮ**

**Декан Геологического факультета  
академик**

\_\_\_\_\_ /Д.Ю.Пушаровский/

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Теория электромагнитных зондирований**

Автор-составитель: Пушкарев П.Ю.

**Уровень высшего образования:**

*Магистратура*

**Направление подготовки:**

**05.04.01 Геология**

**Направленность (профиль) ОПОП: Геофизика**

**Магистерская программа: Геофизика (ММ)**

Форма обучения:

*Очная*

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

Москва 20\_\_

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» в редакции приказа МГУ от 30 декабря 2016 года № 1674.

Год приема на обучение – 2019.

## **Цель и задачи дисциплины**

**Целью** курса "Теория электромагнитных зондирований" является освоение теоретических основ методов низкочастотных электромагнитных зондирований Земли с естественным и искусственным источником.

**Задачи** - получение знаний о постановке и решении основных прямых задач низкочастотных электромагнитных зондирований; выработка понимания закономерностей поведения электромагнитного поля в рамках этих задач; изучение методов анализа и интерпретации данных индукционных электромагнитных зондирований.

**1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО** – вариативная часть, профессиональный цикл, курс – I магистратуры, семестр – 1.

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

Знания в части общекультурной и общенаучной подготовки - на уровне требований Образовательного стандарта МГУ, направление «Геология», уровень бакалавриат; знания в области геологии - в соответствии с требованиями вступительного экзамена в магистратуру (общие вопросы, вопросы профиля «Геофизика»).

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

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

ОПК-2 Способность в процессе решения профессиональных задач самостоятельно получать, интерпретировать и обобщать результаты, разрабатывать рекомендации по их практическому использованию (формируется частично);

ОПК-3 Способность применять на практике знания фундаментальных и прикладных разделов дисциплин, определяющих профиль подготовки (формируется частично);

ПК-2 Способность создавать и исследовать модели изучаемых объектов на основе использования теоретических и практических знаний в области геологии (формируется частично);

ПК-5 Способность использовать современные методы обработки и интерпретации комплексной информации для решения производственных задач (формируется частично);

СПК-1 Способность самостоятельно ставить задачи научных и практических исследований в области геофизики, а также решать их с использованием современных подходов к проведению геофизических наблюдений, обработке данных, решению прямых и обратных задач, геологической интерпретации результатов (формируется частично).

#### **Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю):**

**Знать:** теоретические основы решения прямых одномерных задач электромагнитных зондирований, а также многомерных задач магнитотеллурических зондирований; основные закономерности распределения электромагнитного поля в рамках этих задач;

**Уметь:** выбрать оптимальную методику интерпретации данных электромагнитных зондирований; построить априорную геоэлектрическую модель среды; оценить информативность электромагнитных зондирований по отношению к различным параметрам разреза;

**Владеть:** методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований.

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

**5. Объем дисциплины** составляет 2 з.е., в том числе 28 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (8 часов – занятия лекционного типа, 20 часов – занятия семинарского типа), 44 академических часа на самостоятельную работу обучающихся. Форма промежуточной аттестации – зачет.

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

**Краткое содержание дисциплины (аннотация):**

Рассматривается фундаментальная модель индукционного электромагнитного зондирования, включающая горизонтально-слоистое нижнее полупространство и непроводящее верхнее полупространство, в котором располагается замкнутая система сторонних токов. Как частные случаи этой задачи, получаются одномерные задачи методов зондирования: глубинного магнитовариационного (МВЗ), магнитотеллурического (МТЗ), частотного (ЧЗ) и становлением поля (ЗС). Исследуются основные закономерности электромагнитного поля в рамках этих задач. Применительно к методу МТЗ, рассматриваются также двухмерные и трёхмерные задачи. Дается информация и методах анализа и интерпретации данных.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины,  Форма промежуточной аттестации по дисциплине.	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, часы				
		Занятия лекционного типа	Занятия лабораторного типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Раздел 1. Введение		2			2	
Раздел 2. Фундаментальная модель индукционного зондирования		2		2	4	
Раздел 3. Магнитовариационное зондирование				4	4	Контрольная работа, 10 часов
Раздел 4. МТ зондирование горизонтально-однородных сред				2	2	
Раздел 5. МТ зондирование горизонтально-неоднородных сред		2		2	4	
Раздел 6. Анализ МТ данных				4	4	Контрольная работа, 10 часов
Раздел 7. Интерпретация МТ данных				2	2	
Раздел 8. Поле гармонического вертикального магнитного диполя в ГСС		2		2	4	
Раздел 9. Становление поля вертикального магнитного диполя				2	2	Контрольная работа, 10 часов
Промежуточная аттестация <i>зачет</i>						14 часов
<b>Итого</b>	<b>72</b>			<b>28</b>		<b>44</b>

## **Содержание разделов дисциплины:**

### **1. Введение**

- 1.1. Основные научные Школы по электромагнитным зондированиям
- 1.2. Рекомендуемая литература (монографии, периодические издания) и Интернет-ресурсы
- 1.3. Сведения из теории электромагнитного поля

Раздел включает информацию, необходимую для понимания лекций и самостоятельной работы в ходе курса. Рассматривается история развития электромагнитных зондирований, характеризуются основные научные Школы. Даются ссылки на источники дополнительной информации. Напоминаются необходимые для дальнейшей работы элементы теории поля.

### **2. Фундаментальная модель индукционного зондирования**

- 2.1. Модели среды и источников поля
- 2.2. Пространственные спектры электромагнитного поля
- 2.3. Теорема Липской-Ваньяна
- 2.4. Спектральный импеданс и способы его определения

В данном разделе рассматривается фундаментальная задача, лежащая в основе всех методов индукционного зондирования - о поле, создаваемом в горизонтально-слоистой среде произвольной, расположенной в воздухе, системой замкнутых токов. Задача решается на уровне пространственных спектров. По различным отношениям спектров компонент поля определяется спектральный импеданс, связанный с параметрами слоистой среды.

### **3. Магнитовариационное зондирование (МВЗ)**

- 3.1. Разделение геомагнитного поля на внешнюю и внутреннюю части
- 3.2. Первые опыты по глобальному МВЗ
- 3.3. Построение и интерпретация кривой глобального МВЗ
- 3.4. Зональное и градиентное МВЗ

Раздел посвящен методу зондирования мантии Земли с использованием длиннопериодных вариаций магнитного поля Земли. Рассматривается вопрос о выделении составляющих поля, связанных с магнитосферно-ионосферной токовой системой и с теллурическими (земными) токами. Анализируются несколько способов МВЗ: глобальный, основанный на анализе пространственных спектров магнитного поля, измеренного на всей земной поверхности, а также зональный и градиентный, использующие компоненты поля и их пространственные производные в одной точке земной поверхности.

### **4. МТ зондирование горизонтально-однородных сред**

- 4.1. Плоско-волновое поле, задача Тихонова-Каньяра
- 4.2. Кривые МТЗ
- 4.3. Трансформация Молочнова – Ле Вьета
- 4.4. Решение обратной одномерной задачи МТЗ

В четвертом разделе начинается рассмотрение теории метода МТЗ, основанного на изучении магнитных и электрических компонент переменного поля Земли. Из фундаментальной модели индукционного зондирования, для частного случая плоско-волнового поля, получается решение прямой задачи МТЗ для горизонтально-слоистой среды. Как основная характеристика горизонтально-однородной среды вводится импеданс Тихонова-Каньяра. Анализируются кривые МТЗ, способы их автоматической трансформации, а также интерпретации с учетом априорной информации.

### **5. МТ зондирование горизонтально-неоднородных сред**

- 5.1. Горизонтально-неоднородная геоэлектрическая модель
- 5.2. Разделение поля на нормальную и аномальную части
- 5.3. Две поляризации нормального поля
- 5.4. Тензор импеданса, матрица Визе-Паркинсона

Вводятся в рассмотрение горизонтально-неоднородная модель Земли и ее основные геоэлектрические характеристики – тензор импеданса и матрица Визе-Паркинсона. На основе анализа модели с неоднородностью в горизонтально-слоистой среде, с привлечением метода интегральных уравнений, показывается, что линейные связи между компонентами МТ-поля выводятся из фундаментальных уравнений Максвелла. Анализируются свойства тензора импеданса и матрицы Визе-Паркинсона в одномерной, двухмерной и трехмерной моделях среды.

#### **6. Анализ МТ данных**

- 6.1. Полярные диаграммы и инварианты тензора импеданса
- 6.2. Главные значения и главные направления тензора импеданса
- 6.3. Методы разделения локальных и региональных эффектов
- 6.4. Индукционные стрелки
- 6.5. Двухточечные МТ-матрицы

Раздел посвящен методам анализа МТ-данных, позволяющим выделить основные аномалии электропроводности, определить их размерность и простирание, оценить и подавить влияние приповерхностных неоднородностей. Выводятся и анализируются формулы для определения главных значений и направлений тензора импеданса, а также выделения его региональной составляющей. Помимо тензора импеданса, рассматриваются определяемые только по магнитным компонентам поля матрица Визе-Паркинсона и горизонтальный магнитный тензор.

#### **7. Интерпретация МТ данных**

- 7.1. Решение прямых 2D и 3D задач МТЗ
- 7.2. Решение обратных 2D и 3D задач МТЗ
- 7.3. 2D интерпретация, принцип информационной дополненности
- 7.4. Современная стратегия интерпретации МТ-данных

Дается понятие о современных численных методах и программном обеспечении для решения двумерных и трехмерных прямых и обратных задач МТЗ. Рассматриваются особенности двух поляризации, на которые распадается МТ-поле в 2D среде. Показывается необходимость использования в ходе интерпретации обеих поляризации, сравниваются способы их параллельной и последовательной инверсии. В заключение рассматривается граф анализа и интерпретации МТ-данных применительно к средам различной размерности.

#### **8. Поле гармонического вертикального магнитного диполя (ВМД) в горизонтально-слоистой среде**

- 8.1. Постановка задачи, пространственные спектры компонент поля
- 8.2. Переход от пространственных спектров к компонентам поля
- 8.3. Поле ВМД в однородном полупространстве
- 8.4. Метод зондирования в дальней зоне ВМД
- 8.5. Метод зондирования в ближней зоне ВМД

В этом разделе, на основе фундаментальной модели индукционного зондирования, выводится решение задачи о поле вертикального магнитного диполя, актуальной для методов зондирования с искусственным источником. Рассматривается вопрос о численном определении компонент поля, сводящемся к расчету интегральных преобразований методом линейной фильтрации. Анализируется структура поля в случае однородного полупространства. Описываются два способа зондирования в поле вертикального магнитного диполя: частотного в дальней зоне и геометрического в ближней.

#### **9. Становление поля вертикального магнитного диполя в горизонтально-слоистой среде**

- 9.1. Спектральный метод расчета становления поля
- 9.2. Становление поля ВМД в однородном полупространстве
- 9.3. О расчете поля для двухпетлевой установки

#### 9.4. Анализ становления поля ВМД в дальней и ближней зонах

Последний раздел посвящен теории метода зондирования становлением поля. Рассматривается метод расчета неустановившегося поля, основанный на Фурье-преобразовании решения, получаемого в частотной области. Анализируется поле на поверхности однородного полупространства. Описываются принципы расчета поля для широко используемой на практике двухпетлевой установки с совмещенными и разнесенными питающей и приемной петлями. Рассматриваются модификации метода становления поля в дальней и ближней зонах.

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

**Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего и промежуточного контроля успеваемости.**

**Примерный перечень контрольных вопросов** при проведении контрольных работ и промежуточной аттестации (экзамен):

- (1) Фундаментальная модель индукционного зондирования. Пространственные спектры электромагнитного поля. Уравнения Гельмгольца для спектров.
- (2) Решение уравнения Гельмгольца (теорема Липской-Ваньяна). Вертикальное электрическое поле в Земле.
- (3) МТ- и МВ- способы определения спектрального импеданса.
- (4) Разделение магнитного поля на внешнюю и внутреннюю части.
- (5) Глобальное, зональное и градиентное магнитовариационное зондирование.
- (6) Кривые МТЗ в 1D средах. Асимптоты, трансформации, интерпретация.
- (7) Линейные соотношения между компонентами МТ-поля.
- (8) Полярные диаграммы и инварианты тензора импеданса. Главные значения и направления.
- (9) Разделение локальных и региональных эффектов, метод Бара.
- (10) Матрица Визе-Паркинсона. Двухточечные МТ-матрицы.
- (11) Решение прямых и обратных 2D и 3D задач МТЗ.
- (12) 2D интерпретация МТ-данных.
- (13) Поле гармонического ВМД в горизонтально-слоистой среде.
- (14) Поле гармонического ВМД в однородном полупространстве. Методы зондирования в дальней и ближней зонах ВМД.
- (15) Спектральный метод расчета неустановившегося поля. Неустановившееся поле ВМД в горизонтально-слоистой среде.
- (16) Расчет неустановившегося поля двухпетлевой установки. Становления поля в дальней и ближней зонах ВМД.

#### Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Результаты обучения	«Незачет»	«Зачет»
Знания: теоретических основ решения прямых одномерных задач электромагнитных зондирований, а также многомерных задач магнитотеллурических зондирований; основных закономерностей распределения электромагнитного поля в рамках этих задач;	Знания отсутствуют	Систематические или общие, но не структурированные знания
Умения: выбрать оптимальную методику	Умения отсутствуют	Успешное умение или в целом успешное, но не



интерпретации данных электромагнитных зондирований; построить априорную геоэлектрическую модель среды; оценить информативность электромагнитных зондирований по отношению к различным параметрам разреза;		систематическое умение, допускает неточности непринципиального характера
Владения: методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований	Навыки владения отсутствуют	Владение базовыми навыками

## 8. Ресурсное обеспечение:

### А) Перечень основной и дополнительной литературы.

#### - основная литература:

1. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурические зондирования горизонтально-однородных сред. М.: Недра, 1992. 250 с.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ, 1997. 161 с.-

#### - дополнительная литература:

1. Ковтун А.А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурических зондирований. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 284 с.
2. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.
3. Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка. М.: Недра, 1985. 192 с.
4. Светов Б.С. Теория, методика и интерпретация результатов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 256 с.
5. Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. Часть 2: электромагнитные поля. М.: Недра, 2000. 483 с.
6. Электроразведка: справочник геофизика (в 2 томах). Под ред. Хмелевского В.К. и Бондаренко В.М. М.: Недра, 1989. Книга 1 - 438 с., книга 2 – 378 с.
7. Электромагнитные исследования земных недр. Под ред. Спичака В.В. М.: Научный мир, 2005. 245 с.
8. Жданов М.С. Геофизическая электромагнитная теория и методы. М.: Научный мир, 2012. 680 с.

### 9. Язык преподавания – русский.

### 10. Преподаватель – Пушкарев П.Ю.

### 11. Автор программы – Пушкарев П.Ю.