

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.Ерёмин/  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Теория электромагнитных зондирований**

**Theory of electromagnetic soundings**

Автор-составитель: Пушкарев П.Ю.

**Уровень высшего образования:**  
*Магистратура*

**Направление подготовки:**  
**05.04.01 Геология**

**Магистерская программа:**  
**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 магистратуры*).

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 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.

### 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.

**1. Место дисциплины в структуре ОПОП** – относится к профессиональному блоку вариативной части ОПОП, является обязательной для освоения. Курс – I магистратуры, семестр – 1.

**2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:** обучающийся должен владеть базовыми естественно-научными, математическими и профессиональными знаниями в объеме вступительного экзамена в магистратуру.

**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.ММ.</b> Способен применять на практике знания фундаментальных и прикладных разделов дисциплин, определяющих профиль подготовки при решении задач профессиональной деятельности (формируется частично).	<b>ММ.ОПК-1.И-1.</b> Использует на практике знания фундаментальных и прикладных разделов дисциплин, определяющих профиль подготовки, при решении исследовательских и прикладных задач профессиональной деятельности.	<b>Знать:</b> теоретические основы решения прямых одномерных задач электромагнитных зондирований, а также многомерных задач магнитотеллурических зондирований; основные закономерности распределения электромагнитного поля в рамках этих задач; <b>Уметь:</b> выбрать оптимальную методику интерпретации данных электромагнитных зондирований; построить априорную геоэлектрическую модель среды; оценить информативность электромагнитных зондирований по отношению к различным параметрам разреза; <b>Владеть:</b> методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований.
<b>ОПК-3.ММ.</b>	<b>ММ.ОПК-3.И-2.</b>	<b>Знать:</b> возможности методов

<p>Способен в процессе решения профессиональных задач самостоятельно получать, интерпретировать и обобщать результаты, разрабатывать рекомендации по их практическому использованию (формируется частично).</p>	<p>Объективно оценивает полученные результаты, обобщает их, формулирует выводы.</p>	<p>электромагнитного зондирования при решении различных геологических задач;  <b>Уметь:</b> построить геоэлектрическую модель, согласующуюся с данными электромагнитных зондирований и априорной информацией, а также дать её геологическое истолкование;  <b>Владеть:</b> подходами к построению физико-геологических моделей литосферы с использованием данных электромагнитных зондирований и других геофизических и геологических данных.</p>
<p><b>ПК-2.ММ.</b>  Способен создавать и исследовать модели изучаемых объектов на основе использования теоретических и практических знаний в области геологии (формируется частично).</p>	<p><b>ММ.ПК-2.И-4.</b>  Знает основные особенности интерпретации данных моделирования (по профилю подготовки).</p>	<p><b>Знать:</b> пределы применимости одномерных, двухмерных и трёхмерных геоэлектрических моделей;  <b>Уметь:</b> выбрать оптимальные методы моделирования при решении различных геологических задач;  <b>Владеть:</b> методами построения геоэлектрических моделей разной размерности и с использованием различных способов параметризации.</p>
<p><b>ПК-4.ММ.</b>  Способен использовать современные методы обработки и интерпретации комплексной информации для решения производственных задач (формируется частично)</p>	<p><b>ММ.ПК-4.И-1.</b>  Имеет представление о современных методах обработки и комплексной интерпретации информации, используемых для решения производственных задач (по профилю подготовки).</p>	<p><b>Знать:</b> теоретические основы методов анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований, а также их возможности при комплексной интерпретации геофизических данных;  <b>Уметь:</b> выбрать оптимальную методику анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований при проведении комплексных геолого-геофизических работ;  <b>Владеть:</b> методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований в комплексе геолого-геофизических исследований.</p>
<p><b>МПК-1.</b>  Способен 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</p>	<p><b>МПК-1.И-3.</b>  Знает основы решения прямых и обратных задач геофизики, геологической интерпретации данных.</p>	<p><b>Знать:</b> электрические свойства горных пород и их зависимость от различных факторов, а также возможности методов моделирования данных электромагнитных зондирований, теоретические основы методов интерпретации данных электромагнитных зондирований;  <b>Уметь:</b> строить геоэлектрические модели различных геологических объектов, выбирать оптимальную методику анализа и интерпретации электромагнитных данных при проведении комплексных геолого-геофизических исследований;  <b>Владеть:</b> подходами к оценке чувствительности и разрешающей</p>

прямых и обратных задач, геологической интерпретации результатов (формируется частично).		способности методов электромагнитного зондирования, методами интерпретации данных электромагнитных зондирований с учётом априорной геолого-геофизической информации.
--	--	--

**4. Объем дисциплины** 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 – зачёт.

**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
Раздел 1. Введение	2	2		2		
Раздел 2. Фундаментальная модель индукционного зондирования	4	4		4		
Раздел 3. Магнитовариационное зондирование	2	2		2		
Текущая аттестация 1: контрольная работа	10				10	10
Раздел 4. МТ зондирование горизонтально-однородных сред	2	2		2		
Раздел 5. МТ зондирование горизонтально-неоднородных сред	2	2		2		
Раздел 6. Анализ МТ данных	4	4		4		
Текущая аттестация 2: контрольная работа	10				10	10
Раздел 7. Интерпретация МТ данных	4	2	2	4		
Раздел 8. Поле гармонического вертикального магнитного диполя в горизонтально-слоистой среде	4	4		4		
Раздел 9. Становление поля вертикального магнитного диполя	4	2	2	4		
Текущая аттестация 3: контрольная работа	10				10	10
Промежуточная аттестация <i>зачёт</i>	14	<i>Устный зачёт</i>			14	
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>28</b>			<b>44</b>	

## Содержание лекций, семинаров

### Содержание лекций

#### 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 поляризаций, на которые распадается МТ-поле в 2D среде. Показывается необходимость использования в ходе интерпретации обеих поляризаций, 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.

*План проведения семинаров.*

1. Особенности глубинных ЭМ зондирований, учёт сферичности Земли
2. Особенности ЭМ поля при индукционном и гальваническом возбуждении

## **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 трёх разделов курса.

Примеры вопросов на контрольных работах:

- Кто и когда ввёл в электроразведке понятие тензора импеданса;
- Уравнения магнитного поля и его пространственного спектра в слоистой среде;
- Формула для вычисления импеданса при градиентном МВЗ;
- Как определяются обобщённые параметры разреза по кривым МТЗ;
- Линейные соотношения между компонентами МТ поля;
- Изобразить полярные диаграммы тензора импеданса для 2D среды;
- Формула сглаживающего стабилизатора при решении 2D обратной задачи МТЗ;
- Асимптоты ближней зоны на кривых ЧЗ по различным компонентам поля;
- Как, зная поле магнитного диполя, вычислить поле для установки «петля в петле».

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

*Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации (зачёте):*

- (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 (зачёт).**

Оценка результатов обучения, <i>соответствующие виды оценочных средств</i>	<b>Незачет</b>	<b>Зачет</b>
<p><b>Знания</b> теоретических основ решения одномерных задач электромагнитных зондирований, а также многомерных задач магнитотеллурических зондирований; основных закономерностей распределения электромагнитного поля в рамках этих задач <i>(письменный или устный опрос)</i></p>	<p>Фрагментарные знания или отсутствие знаний</p>	<p>Сформированные систематические знания или общие, но не структурированные знания</p>
<p><b>Умения</b> выбрать оптимальную методику интерпретации данных электромагнитных зондирований; построить априорную геоэлектрическую модель среды; оценить информативность электромагнитных зондирований по отношению к различным параметрам разреза <i>(письменный или устный опрос)</i></p>	<p>В целом успешное, но не систематическое умение или отсутствие умений</p>	<p>Успешное и систематическое умение или в целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности не принципиального характера)</p>
<p><b>Навыки (владения, опыт деятельности)</b> методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований <i>(письменный или устный опрос)</i></p>	<p>Наличие отдельных навыков или отсутствие навыков</p>	<p>Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач или, в целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме</p>

## **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**

Ответственный за курс: Пушкарев Павел Юрьевич.

Преподаватель: Пушкарев П.Ю.

## **11. Разработчик программы: Пушкарев П.Ю., профессор.**